工程材料性能与选用

韩永生　编著

GONGCHENG CAILIAO XINGNENG YU XUANYONG

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

工程材料性能与选用

韩永生　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书系统地介绍了常用工程材料的基本知识，包括塑料、橡胶、纤维、木材、石材、玻璃、陶瓷、黑色金属和有色金属材料、粘合剂、涂料、无机胶凝材料和复合材料等。对各类材料的结构与基本性质、主要品种和特点以及每一种材料的应用方法都作了较为详细的介绍。同时还介绍了一般产品设计时选择材料的原则和方法。在编写时力求做到既通俗易懂、深入浅出，又不过多地涉及有关专业理论。

本书既有精炼的基本理论，又有具体数据与实例，篇幅适中，是一本内容比较全面的关于材料选择与应用的简明书籍。既可供从事工业产品设计专业和相关非材料专业的技术人员参考使用，也可供大专院校的工业设计、环境设计等非材料专业的教师和学生参考。

图书在版编目（CIP）数据

工程材料性能与选用/韩永生编著. —北京：机械工业出版社，2013.8
ISBN 978-7-111-43720-8

Ⅰ.①工… Ⅱ.①韩… Ⅲ.①工程材料 Ⅳ.①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 195456 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：张秀恩 责任编辑：张秀恩 王彦青
版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉
封面设计：陈 沛 责任印制：张 楠
唐山丰电印务有限公司印刷
2013 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm · 25.5 印张 · 526 千字
0 001— 3000册
标准书号：ISBN 978-7-111-43720-8
定价：69.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务 网络服务
社 服 务 中 心：(010)88361066 教 材 网：http://www.cmpedu.com
销 售 一 部：(010)68326294 机工官网：http://www.cmpbook.com
销 售 二 部：(010)88379649 机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)88379203 **封面无防伪标均为盗版**

前　言

随着科学技术的不断发展，工业设计人员对材料性能的要求越来越高，而传统的金属和非金属材料在许多方面已不能满足要求，因而促进了新材料的不断出现和推广。在某些方面，非金属材料的应用日益增多，尤其是高分子材料和复合材料的发展更为迅速；具有许多特殊性能的各类新材料也已显露锋芒。因此，设计人员需要掌握各种材料尤其是新材料的基本知识，并能够进行合理选用。

本书系统地介绍了常用工程材料的基本知识，包括塑料、橡胶、纤维、木材、石材、玻璃、陶瓷、黑色金属和有色金属材料、粘合剂、涂料、无机胶凝材料和复合材料等。对各类材料的结构与基本性质、主要品种和特点以及每一种材料的应用方法都作了较为详细的介绍。同时还介绍了进行一般产品设计时选择材料的原则和方法。在编写时力求做到既通俗易懂、深入浅出，又不过多地涉及有关专业理论，做到了理论与实践密切结合。可供从事工业产品设计专业和相关非材料专业的技术人员在进行产品设计时参考使用。

另外，许多大专院校尤其是艺术类专业的工业设计等专业已经开设或正在准备开设有关材料性能和选择方面的课程，以使学生掌握较为坚实的材料知识。然而，目前满足这种要求的教材和参考书还不多，本书既有精炼的基本理论，又有具体数据与实例，篇幅适中，是一本内容比较全面的关于材料的简明书籍。因此也可以供大专院校的工业设计、环境设计等非材料专业的教师和学生作为教学参考书。

本书初稿曾为天津科技大学工业设计专业开设的《材料工艺学》课程作为教材试用过。在讲授后，根据有关意见与建议，作了多次修改。随着材料科学的不断进步，许多传统的材料退出了常用领域，本书修改了部分不适合当今时代的某些材料的应用方法，修订、增加了部分新内容。

本书在编写过程中，参考了大量的相关资料，除书末注明的参考资料外，其余的参考资料主要有：公开出版的各类报纸、刊物和书籍；笔者对企业的调研；因特网上的检索。在此向参考资料的各位作者表示谢意！

由于编者水平有限，书中的疏漏和错误在所难免，恳请读者批评指正，多提宝贵意见，使之不断完善，编者在此预致谢意。

编　者

目　录

前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　概述 …… 1

1.2　工程材料的分类 …… 1

1.3　工程材料的基本性质 …… 2

1.3.1　物理性质 …… 3

1.3.2　力学性质 …… 15

1.3.3　耐久性 …… 32

第 2 章　塑料和橡胶 …… 40

2.1　概述 …… 40

2.2　高分子合成材料 …… 40

2.2.1　高分子化合物概述 …… 40

2.2.2　高分子化合物的基本反应 …… 42

2.2.3　高分子化合物的物理状态 …… 44

2.2.4　高分子化合物的老化与防老化 …… 47

2.3　塑料 …… 47

2.3.1　塑料的组成、分类 …… 48

2.3.2　塑料的性能 …… 48

2.3.3　常用塑料简介 …… 51

2.4　塑料制品的生产工艺 …… 76

2.4.1　挤出成型 …… 76

2.4.2　注射成型 …… 77

2.4.3　压制成型 …… 77

2.4.4　压延成型 …… 78

2.4.5　回转成型 …… 78

2.4.6　浇铸成型 …… 78

2.4.7　真空成型和二次加工 …… 78

2.4.8　泡沫塑料成型 …… 79

2.5　塑料的装饰 …… 80

2.5.1　塑料电镀 …… 80

2.5.2　真空镀铝 …… 81

2.5.3　塑料烫印 …… 81

2.5.4　塑料印刷 …… 82

2.5.5　薄膜贴花 …… 82

2.5.6　仿真人造革 …… 82
2.5.7　塑料移印 …… 83
2.5.8　塑料植绒 …… 83
2.6　橡胶 …… 83
2.6.1　简介 …… 83
2.6.2　生胶 …… 84
2.7　橡胶配合剂 …… 96
2.8　橡胶生产工艺 …… 96
2.8.1　塑炼和混炼 …… 96
2.8.2　成型硫化 …… 98
2.9　橡胶的主要技术性能与应用 …… 99
2.9.1　主要技术性能 …… 99
2.9.2　应用 …… 101
2.10　橡胶的老化及防止 …… 105
2.10.1　影响橡胶老化的因素 …… 105
2.10.2　橡胶老化的防止 …… 106
第3章　纤维 …… 108
3.1　纤维的基本知识 …… 108
3.1.1　分类 …… 108
3.1.2　命名 …… 110
3.1.3　主要性能指标 …… 111
3.2　纤维的性质 …… 112
3.2.1　天然纤维 …… 112
3.2.2　人造纤维 …… 116
3.2.3　常用合成纤维 …… 119
第4章　木材 …… 132
4.1　概述 …… 132
4.2　木材的基本知识 …… 132
4.2.1　木材的分类 …… 132
4.2.2　木材的构造 …… 133
4.3　木材的基本性质 …… 135
4.3.1　密度和体积密度 …… 135
4.3.2　导热性 …… 136
4.3.3　含水率 …… 136
4.3.4　吸湿性 …… 137
4.3.5　湿胀与干缩 …… 138
4.3.6　声学和光学性能 …… 141
4.3.7　导电性 …… 142
4.3.8　强度 …… 142

4.4 木材的工艺性质 …… 146
4.5 木材的缺陷 …… 147
4.5.1 树木本身的缺陷 …… 147
4.5.2 木材的加工缺陷 …… 151
4.5.3 有缺陷木材的合理利用 …… 154
4.6 我国主要木材的特点 …… 155
4.7 人造板材 …… 156
4.7.1 胶合板 …… 156
4.7.2 纤维板 …… 158
4.7.3 刨花板 …… 158
4.7.4 覆面细木工板（大芯板） …… 159
4.8 竹材 …… 160
4.8.1 竹材的构造 …… 160
4.8.2 竹材的物理、力学性质 …… 161
4.8.3 竹材质量检验和用途 …… 161
第5章 石材 …… 163
5.1 岩石与石材的基本知识 …… 163
5.1.1 造岩矿物与岩石的构造和命名 …… 163
5.1.2 常用岩石的分类及性质 …… 166
5.1.3 石材的加工 …… 169
5.1.4 天然石材的选用 …… 171
5.2 天然大理石 …… 172
5.2.1 大理石的概念和特点 …… 172
5.2.2 大理石的主要品种 …… 173
5.2.3 天然大理石板材的贮存和选用 …… 176
5.3 天然花岗石 …… 176
5.3.1 花岗石的概念和特点 …… 176
5.3.2 花岗石的品种 …… 176
5.3.3 天然花岗石板材的贮存和应用 …… 178
5.3.4 天然石材的保养 …… 179
5.4 其他石材 …… 179
5.4.1 石英石系列 …… 179
5.4.2 云母石系列 …… 179
5.4.3 筋石系列 …… 179
5.4.4 化石系列 …… 179
5.4.5 玉石系列 …… 179
5.4.6 卵石 …… 180
5.4.7 木纹石、洞石、黑珍珠和南非金沙石 …… 180
5.5 青石板与板岩饰面板 …… 180

5.5.1　青石板 …… 180
5.5.2　板岩板 …… 180
5.6　人造饰面石材 …… 181
5.6.1　水泥型人造饰面石材 …… 182
5.6.2　聚酯型人造饰面石材 …… 182
5.6.3　树脂型人造石材 …… 183
5.6.4　复合型人造饰面石材 …… 183
5.6.5　烧结型人造饰面石材 …… 183
5.7　石材的天然放射性 …… 184
第6章　玻璃 …… 189
6.1　概述 …… 189
6.2　玻璃的化学组成 …… 190
6.2.1　钠钙玻璃 …… 191
6.2.2　铅钾玻璃 …… 191
6.2.3　铅玻璃 …… 191
6.2.4　镁铝玻璃 …… 191
6.2.5　硼硅玻璃 …… 192
6.3　玻璃的生产 …… 192
6.3.1　玻璃原料 …… 192
6.3.2　玻璃熔制 …… 194
6.3.3　玻璃成型 …… 195
6.3.4　玻璃的退火 …… 197
6.4　玻璃制品的二次加工 …… 197
6.4.1　冷加工 …… 197
6.4.2　热加工 …… 199
6.4.3　表面处理 …… 199
6.5　玻璃的缺陷 …… 201
6.5.1　结石 …… 201
6.5.2　气泡 …… 201
6.5.3　条纹和节瘤 …… 201
6.6　玻璃的性能 …… 202
6.6.1　力学性能 …… 202
6.6.2　机械强度 …… 202
6.6.3　热学性能 …… 203
6.6.4　光学和着色性能 …… 204
6.6.5　化学稳定性 …… 207
6.6.6　电学性能 …… 208
6.6.7　阻隔性能 …… 208
6.7　玻璃的主要品种和应用 …… 208

6.7.1 建筑玻璃 …… 208
6.7.2 安全玻璃 …… 210
6.7.3 信号玻璃 …… 211
6.7.4 特种玻璃 …… 212
6.7.5 瓶罐玻璃 …… 213
第7章 陶瓷 …… 214
7.1 概述 …… 214
7.2 陶瓷材料的一般性能 …… 214
7.2.1 力学性能 …… 214
7.2.2 物理性能和化学性能 …… 216
7.3 普通陶瓷 …… 216
7.3.1 普通陶瓷的分类 …… 216
7.3.2 陶瓷原料的成分 …… 217
7.3.3 陶瓷制品的制造 …… 217
7.3.4 传统陶瓷 …… 218
7.4 釉 …… 222
7.4.1 釉的特点、性质及制釉原料 …… 223
7.4.2 釉的分类 …… 224
7.5 琉璃制品 …… 227
第8章 金属 …… 229
8.1 金属材料及分类 …… 229
8.2 金属热处理工艺基础 …… 229
8.2.1 简介 …… 229
8.2.2 钢的退火与正火 …… 230
8.2.3 钢的淬火与回火 …… 231
8.2.4 钢的表面热处理 …… 234
8.2.5 其他热处理工艺 …… 235
8.3 铸铁 …… 236
8.3.1 简介 …… 236
8.3.2 铸铁的分类 …… 237
8.3.3 灰铸铁 …… 237
8.3.4 其他常用铸铁 …… 239
8.4 钢 …… 243
8.4.1 钢的分类与牌号 …… 243
8.4.2 非合金钢 …… 245
8.4.3 低合金钢 …… 248
8.4.4 合金结构钢 …… 250
8.4.5 合金工具钢和高速工具钢 …… 255
8.4.6 不锈钢、耐热钢及特殊物理性能钢 …… 258

8.5　有色金属 …… 261
8.5.1　铜及铜合金 …… 261
8.5.2　铝及铝合金 …… 266
8.6　钢铁的化学处理 …… 270
8.7　金属的表面镀饰 …… 270
8.7.1　电镀 …… 271
8.7.2　电刷镀 …… 272
8.7.3　复合电镀 …… 273
8.7.4　真空离子镀 …… 273
8.7.5　热浸镀 …… 275
8.7.6　热喷涂 …… 275
8.7.7　冰花镀 …… 275
8.7.8　镀黑 …… 276
8.7.9　其他表面处理方法 …… 276
8.7.10　彩色涂层钢板 …… 276
8.7.11　彩色氧化铝 …… 277
第9章　粘合剂 …… 279
9.1　粘合剂的组成与分类 …… 280
9.1.1　组成 …… 280
9.1.2　分类 …… 281
9.2　粘接机理 …… 282
9.2.1　产生粘合的基本条件 …… 282
9.2.2　粘合理论 …… 283
9.2.3　影响粘合强度的因素 …… 286
9.3　常用粘合剂 …… 287
9.3.1　葡萄糖衍生物粘合剂 …… 287
9.3.2　热熔型粘合剂 …… 288
9.3.3　溶剂型粘合剂 …… 288
9.3.4　乳液型粘合剂 …… 289
9.3.5　环氧粘合剂 …… 290
9.3.6　改性酚醛粘合剂 …… 293
9.3.7　聚氨酯粘合剂 …… 293
9.3.8　α－氰基丙烯酸酯胶 …… 294
9.3.9　厌氧粘合剂 …… 294
9.3.10　无机粘合剂 …… 295
9.4　粘接工艺 …… 295
9.4.1　粘合剂的选用 …… 296
9.4.2　粘接接头的设计 …… 296
9.4.3　表面处理 …… 301

9.4.4 粘合剂的配制和涂敷 …… 308
9.4.5 粘合剂的晾置与固化 …… 309
9.4.6 塑料的粘合 …… 312
9.5 粘接质量无损检验方法 …… 313
9.5.1 目视法 …… 313
9.5.2 敲击法 …… 313
9.5.3 声阻探伤法 …… 313
9.5.4 超声波探伤法 …… 314
9.5.5 液晶探伤法 …… 314
9.5.6 辅助检验 …… 315
9.6 安全和防护 …… 315
9.6.1 常见粘合剂和溶剂的毒性 …… 315
9.6.2 中毒的途径、症状及防护 …… 317
9.6.3 燃烧与爆炸 …… 319
第 10 章 涂料 …… 321
10.1 概述 …… 321
10.1.1 涂料的作用 …… 321
10.1.2 涂料的组成、分类与表示法 …… 321
10.2 涂料用油及天然树脂和人造树脂 …… 324
10.2.1 涂料用油 …… 324
10.2.2 涂料用天然树脂和人造树脂 …… 325
10.3 涂料用合成树脂 …… 326
10.3.1 涂料用合成树脂的特点 …… 326
10.3.2 涂料用合成树脂的品种 …… 327
10.4 涂料的次要成膜物质和辅助成膜物质 …… 331
10.4.1 次要成膜物质 …… 331
10.4.2 辅助成膜物质 …… 332
10.5 常用涂料 …… 334
10.5.1 酚醛树脂涂料 …… 334
10.5.2 醇酸树脂涂料 …… 336
10.5.3 氨基树脂涂料 …… 336
10.5.4 防锈涂料 …… 336
10.5.5 水溶性涂料 …… 339
10.5.6 其他品种涂料 …… 340
10.6 特种涂料 …… 343
10.6.1 烧蚀隔热涂料 …… 343
10.6.2 耐辐射涂料 …… 343
10.6.3 示温涂料 …… 343
10.6.4 导电涂料 …… 344

10.6.5　发光涂料 …… 344
10.6.6　伪装涂料 …… 345
10.6.7　润滑涂料 …… 345
10.6.8　陶瓷涂料 …… 345
10.6.9　防火涂料 …… 346
10.6.10　灭虫涂料 …… 346
10.6.11　金属罐用涂料 …… 346
10.6.12　塑料用涂料 …… 347
10.6.13　纸用涂料 …… 348
10.7　涂料的选择 …… 348
10.8　涂料的施涂工艺 …… 349
第11章　无机胶凝材料 …… 351
11.1　石膏 …… 351
11.1.1　石膏原料与石膏的生产 …… 351
11.1.2　建筑石膏的分类及技术指标 …… 351
11.1.3　建筑石膏的硬化 …… 352
11.1.4　建筑石膏的应用 …… 353
11.1.5　建筑石膏的使用与保管 …… 353
11.2　石灰 …… 353
11.2.1　石灰的烧制 …… 353
11.2.2　石灰的熟化 …… 354
11.2.3　石灰的硬化 …… 354
11.2.4　石灰的技术性能 …… 355
11.2.5　石灰的用途 …… 356
11.2.6　石灰的保管 …… 356
11.2.7　磨细生石灰粉 …… 356
11.3　水玻璃 …… 357
11.4　菱苦土 …… 358
11.5　水泥 …… 358
11.5.1　水泥的技术性质 …… 358
11.5.2　水泥的种类和标号 …… 359
11.5.3　水泥品种的选用 …… 361
11.5.4　水泥的储运管理 …… 363
第12章　复合材料 …… 365
12.1　概述 …… 365
12.2　复合材料的分类与特性 …… 365
12.2.1　分类 …… 365
12.2.2　特性 …… 366
12.3　复合理论 …… 366
12.4　纤维增强复合材料 …… 367

12.4.1 纤维增强复合材料的特点 …… 367
12.4.2 结构设计与强度复合 …… 369
12.4.3 纤维增强复合材料品种简介 …… 369
12.5 层合复合材料 …… 374
12.5.1 双层金属复合材料 …… 374
12.5.2 塑料/金属多层复合材料 …… 374
12.5.3 夹层结构复合材料 …… 375
12.5.4 塑料软包装复合薄膜和片材 …… 375
12.6 颗粒复合材料 …… 377
12.7 复合材料的应用 …… 378
第 13 章 材料的选用 …… 380
13.1 选材的原则与方法 …… 380
13.2 金属零件的选材 …… 381
13.2.1 选材的一般原则 …… 381
13.2.2 工艺性原则 …… 382
13.2.3 经济性原则 …… 382
13.2.4 选材的一般步骤和应注意的问题 …… 383
13.2.5 典型零件选材及工艺分析 …… 384
13.3 塑料零件的选材 …… 387
13.3.1 塑料选用的一般原则和方法 …… 387
13.3.2 典型零件的选材 …… 388
13.3.3 不宜选用塑料的情况 …… 389
13.3.4 塑料的加工性能 …… 391
13.3.5 塑料制品的成本 …… 393
参考文献 …… 396

第1章　绪　　论

材料是工业技术发展的基础。人们生产的制品所采用的材料是否先进，能直接反映出当时社会的生产水平。人类社会从落后到先进的发展进程，实际上也可以看做是材料发展的历程。典型的例子可以从人类社会发展的标志看出：石器时代、青铜时代、铁器时代，直到现在的以新材料为代表的新技术革命时代。

现在，各种新型材料被不断开发出来，新材料的特点是高性能化、功能化、复合化。传统的金属材料、无机材料、有机材料的界线逐渐模糊。材料科学已成为多学科相互交叉、相互渗透的科学。因此，很有必要全面了解传统材料与新材料的知识，对材料科学有一个基本的了解，扩大材料领域的知识面，并掌握有关材料的发展规律。了解并掌握材料的性能和它们的变化规律并能够合理选择与使用。

1.1　概述

材料是物质的一部分，是人类用来制造器件、构件或其他可供使用的物质的总称。一般为经过加工的天然物质，如金属、水泥、塑料等。材料的品种、数量和质量是衡量一个国家科学技术和国民经济水平以及国防实力的重要标志之一。

长期以来，人们对材料本质的认识是逐步深入的，不少传统材料的发展、制备和使用都凭经验或者靠师徒传授进行的。后来，随着经验积累、总结提高成为“材料工艺学”，从此材料进入一个新的发展阶段。由于材料是一切工程的物质基础，所以，材料科学不仅探讨材料属性的微观机理，而且更注重材料的使用性能和工程价值。因此，材料科学的研究成果有着重要的社会意义。新型材料发展，将促进我国新产品、新技术的发展。本书主要研究和介绍在工业设计以及工程中经常使用的材料，即工程材料的性能及选择和使用。

1.2　工程材料的分类

工程材料的品种非常繁杂。要想全面了解和掌握各种工程材料的性能、特点和用途，首先需要对其进行合理的分类。

工程材料按化学成分可分为金属材料，如黑色金属（铸铁、碳钢和合金钢）和有色金属（轻有色金属、重有色金属、贵金属和稀有金属等）；无机非金属材料，如传统的硅酸盐材料（水泥、玻璃、陶瓷和耐火材料）和新型陶瓷（除 SiO_2 以外的其他氧化物、碳化物、硼化物、氮化物等材料）；有机非金属材料，如石油

燃料、润滑油脂、合成橡胶、塑料、合成纤维、胶粘材料以及天然动植物材料等，详见表1-1。

表1-1　工程材料按化学成分分类

金属材料	黑色金属材料	铸铁、碳钢、合金钢	
	有色金属材料	铝及铝合金、铜及铜合金、钛合金、贵金属、稀有金属	
非金属材料	无机非金属材料	天然石材	大理石、花岗岩等
		陶瓷	陶器、瓷器、炻器等
		玻璃	硅酸盐玻璃、硼酸盐玻璃、碱硼硅酸盐玻璃
		水泥	硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥等
		混凝土	无机胶凝材料混凝土、有机胶凝材料混凝土
	有机材料	木材	木材、胶合板、纤维板、细木工板
		竹材、藤材	
		纤维	天然纤维、合成纤维、人造纤维
		高分子材料	塑料、橡胶
		涂料、粘合剂及其他	
复合材料	有机与无机复合材料	钙塑材料	
	金属与非金属复合材料	彩色涂层钢板、铝塑复合材料	

按用途分为结构材料和功能材料，前者主要是利用其物理力学性能，如结构材料中的金属、石材、粘土砖、混凝土及木材等；功能材料是通过光学、电学、声学、磁学、化学、物理化学、生物化学等特性而完成特定功能的材料，如半导体材料、磁性材料、激光材料及超导材料等。

按物理力学性能，材料又可以分为高强材料、高温材料及导电材料等。按状态分为单晶材料、多晶材料及非晶材料等。本书主要按化学成分的分类介绍工程材料的选择与使用。

1.3　工程材料的基本性质

工程材料在使用过程中，要承受各种介质（如水、蒸汽、腐蚀性气体和流体等）的作用以及各种物理作用（如温度差、湿度差、摩擦等），而且工程材料在运输及使用过程中不可避免地会受到碰撞或遭到一定外力的作用，因此，工程材料必

须具有抵抗上述各种作用的能力。为保证工程材料的正常使用，对许多工程材料还要求具有一定的防水、防腐、耐热、防火、声学、光学等性质。因此，掌握工程材料的基本性质是正确选择与合理使用工程材料的基础。

工程材料所具有的性质是由材料的组成、结构与构造等内部因素所决定的，所以了解其性质和组成是非常必要的。

1.3.1 物理性质

1. 与质量有关的性质

（1）密度 指材料在绝对密实状态下，单位体积的质量。密度（ρ）可用下式表示：

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中 ρ——材料的密度（g/cm^3）；

m——材料在干燥状态下的质量（g）；

V——材料在绝对密实状态下的体积（不包括内部任何孔隙的体积，cm^3）。

材料的密度ρ大小取决于材料的组成与材料的内部结构。

密度是材料的状态参数，用以表示材料物理状态的特征。不同组成的材料（金属材料、有机材料、无机非金属材料）的密度相差颇大；同属无机非金属材料由于结晶状态不同（如金刚石与石墨），密度也不同；组成相同的材料，因结构状态不同（如玻璃体与晶体），密度也不相同。因此，材料的密度在这里也同时说明了固体材料的结构特征。密度又是衡量材料轻重的一个指标，同时它还反映材料的强度、硬度、熔点、吸水性、导热性及耐久性等性质的大小。密度可作为材料质量评定和选用的依据之一。在产品的设计和制造过程中，如何减少自重，增加承载能力，密度是重点考虑的对象。

（2）体积密度（表观密度） 指材料在自然状态下，单位体积的质量。按下式计算：

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

式中 ρ_0——材料的体积密度（g/cm^3）；

m——材料的质量（g）；

V_0——材料在自然状态下的体积（或叫表观体积，包括材料内部所有开闭口孔隙的体积，cm^3）。

测定材料的体积密度时，材料的质量可以是在任意含水状态下的质量，但需说明含水情况。通常所指的体积密度是指材料在干燥状态下的体积密度。当材料处在烘干状态下时，称为气干体积密度，简称体积密度。材料的体积密度除与材料的密度有关外，还与材料内部孔隙的体积有关，材料的孔隙率越大，则材料的体积密度

越小。因此，对于多孔材料而言，它们的体积密度明显小于其密度值，只有密实材料的体积密度接近或等于其密度值。

（3）堆积密度　指粒状（粉状）材料，在堆积状态下，单位体积的质量。按下式计算：

$$\rho_0' = \frac{m}{V_0'}$$

式中　ρ_0'——材料的堆积密度（g/cm^3）；

m——材料的质量（g）；

V_0'——材料的堆积体积（cm^3）。

测定松散材料的堆积密度时，材料的质量是指填充在一定容器内的材料质量，其堆积体积是指所用容器的容积。因此，材料的堆积体积包含了颗粒之间的空隙和颗粒内部的孔隙。

在实际生产中，材料用量的计算、堆放空间确定以及材料自重和体积的计算，经常要用到材料的密度、表观密度和堆积密度等物理常数。常用非金属材料的几种密度值见表1-2。

表1-2　常用非金属材料的几种密度值

名称	密度/（g/cm^3）	表观密度/（g/cm^3）	堆积密度/（g/cm^3）
石灰石	2.6	1.8～2.6	—
花岗石	2.8	2.5～2.9	—
砂	2.6	—	1.45～1.65
粘土	2.6	—	1.60～1.80
普通粘土砖	2.5	1.60～1.80	—
水泥	3.1	—	1.20～1.30
普通混凝土	—	2.10～2.60	—
木材	1.55	0.40～0.80	—
泡沫塑料	—	0.020～0.050	—

（4）密实度与孔隙率

1）密实度是指材料体积内被固体物质所充实的程度。密实度（D）可用下式计算：

$$D = \frac{V}{V_0} \times 100\% = \frac{\rho_0}{\rho} \times 100\%$$

式中　D——密实度（%）；

V——材料中固体物质体积（cm^3 或 m^3）；

V_0——材料体积（包括内部孔隙体积 cm^3 或 m^3）；

ρ_0——体积密度（g/cm^3 或 kg/m^3）；

ρ——密度（g/cm^3 或 kg/m^3）。

材料的孔隙结构包括孔隙率、孔径分布、孔的形貌与排列等。目前孔隙学的研究在材料工程应用中受到一定重视。

2）孔隙率是指材料中，孔隙体积所占整个体积的比例。即材料中孔隙体积与总体积的百分率。孔隙率（P）可用下式计算：

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \times 100\%$$

若已知材料的密度与表观密度可直接求得孔隙率。式中的 ρ_0/ρ 称为密实度。对于密实材料，其密实度为1。绝大部分无机材料均含有孔隙，其孔隙率大小直观反映了材料内部构造的疏松或致密度程度。对任何材料来说，孔隙率加密实度等于1。材料的密度、表观密度及孔隙率是材料最基本的物理特性，可以反映材料内部被固体物质充实的程度。非金属材料的孔隙率在很大范围内波动，如平板玻璃的孔隙率接近于零，而微孔橡胶的孔隙率却高达98%。

3）空隙率是指散粒材料在某堆积体积中，颗粒之间的空隙体积所占的比例，或指松散材料中颗粒之间的空隙体积与总体积的百分率。如对于砂石散粒材料，可用空隙率来表示颗粒之间的紧密程度。空隙率（P'）可用下式表示：

$$P' = \frac{V_0' - V}{V_0'} \times 100\% = 1 - \frac{\rho_0'}{\rho} \times 100\%$$

式中 ρ_0'/ρ_0 反映松散材料在堆积体积中被颗粒填充的程度，又称填充率，对松散材料而言，空隙率 + 填充率 = 1。空隙率大小反映松散材料的颗粒之间相互填充的致密程度。

一般情况下，材料内部的孔隙率越大，则材料的体积密度、强度越小，耐磨性、抗冻性、抗渗性、耐蚀性、耐水性及其他耐久性越差，而保温性、吸声性、吸水性与吸湿性越强。上述性质不仅与材料的孔隙率大小有关，还与孔隙特征（如开口孔隙、闭口孔隙、球型孔隙等）有关。

4）开口孔隙率又称显孔隙率，是指被水饱和的孔隙体积与材料总体积的百分率。按下式计算：

$$P_k = \frac{m_2 - m_1}{V_0} \times \frac{1}{\rho_W} \times 100\%$$

式中 m_1——材料在干燥状态下的质量（kg 或 g）；

m_2——材料在饱水状态下的质量（kg 或 g）；

V_0——材料的表观体积（m^3 或 cm^3）；

ρ_W——水的密度（4℃）（kg/m^3 或 g/cm^3）。

材料的开口孔隙与周围介质相通，孔隙之间也相通，一般在浸水条件下，可被水所饱和。开口孔隙率降低了材料的强度、抗冻性和耐水性。

5）闭口孔隙率（P_B）是其总孔隙率（P）与开口孔隙率（P_K）之差。按下

式计算：

$$P_B = P - P_K$$

闭口孔隙是指不能被水所饱和的孔隙。多孔材料中既含有开口孔隙，也含有闭口孔隙，减少开口孔隙，增加闭口孔隙，可以提高材料的耐久性。

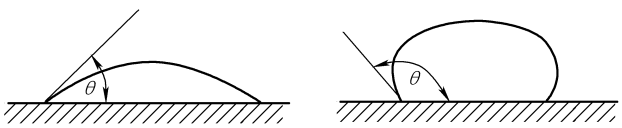
常用非金属材料的孔隙率见表 1-3。

表 1-3　常用非金属材料的孔隙率

材料名称	孔隙率（%）
花岗岩	0.5～1.0
石灰岩	0.6～1.5
普通混凝土	5～20
烧结普通砖	20～40
松木	55～75
钢材	0
石膏板	30～70

2. 材料与水有关的性质

（1）亲水性与憎水性　固体材料在空气中与水接触时，其表面是否能够被水润湿和材料的表面性质有关。材料的表面都具有表面能，即单位面积所具有的自由能（J/m^2）。为研究方便，可把材料的表面能近似为表面张力（σ），其物理意义是作用界面单位长度上使界面收缩的力（N/m）。对于指定体系，其表面张力和表面能的数值是相同的，只是物理涵义不同。依据热力学第二定律，固体材料都力图使这种表层分子多余的能（或功）降低至最小，因此材料表面都自发通过对水分的吸附而处于稳定状态。当固体材料在空气中与水接触达到平衡时，可能出现图 1-1 中所示的状态。



a)　　b)

图 1-1　材料润湿示意图

a）亲水性材料　b）憎水性材料

材料、水和空气相互接触必有一个三相交点，在三相交点上有三种表面张力，即材料与空气界面的表面张力为 $\sigma_{气-固}$；材料与水界面的表面张力为 $\sigma_{液-固}$；水与空气界面的表面张力为 $\sigma_{气-液}$。当这三个力平衡时可得出下式：

$$\sigma_{气-固} = \sigma_{液-固} + \sigma_{气-液}\cos\theta$$

式中，θ 为材料的润湿角，是由材料、水和空气相互接触的三相交点处，沿水滴表面的切线和水接触形成的夹角。

当材料与水接触时，有些材料能被水润湿；有些材料，则不能被水润湿。前者称材料具有亲水性，后者称材料具有憎水性。如果 $\sigma_{气-固} > \sigma_{液-固}$，则 $0° < \theta < 60°$，材料表现为亲水性，即这种材料的表面可以被水润湿，水分子之间的内聚力小于水分子与材料分子之间的相互吸引力，通常称为亲水材料。如果 $\sigma_{气-固} < \sigma_{液-固}$，则 $90° < \theta < 180°$，材料表现为憎水性，即这种材料的表面不可被水润湿，水分子之间的内聚力大于水分子与材料分子之间的相互吸引力，通常称为憎水性材料。当 $\theta = 0$ 时，表明材料完全被水润湿。亲水性材料是通过毛细管作用，将水分吸入毛细管内部；憎水性材料则能阻止水分渗入毛细管内。常见的憎水性材料有沥青、石蜡、大多数的塑料树脂和橡胶等，它们不仅可用作防水材料、防腐材料，还可用于亲水性材料（混凝土、石材、砖瓦和木材等）的表面处理，以提高材料的防水性和防腐性。常见物质的表面张力见表1-4。

表1-4 常见物质的表面张力

物质名称	温度/℃	表面张力/(mN/m)	物质名称	温度/℃	表面张力/(mN/m)
汞	20	484	酚醛树脂胶粘剂	20	78
铅	350	442	尿醛胶粘剂	20	71
锌	700	538	间苯二酚—甲醛胶粘剂	20	48
铝	700	750	环氧树脂胶粘剂	20	47
银	1000	920	聚醋酸乙烯乳液	20	38
金	1120	1128	硝基胶	20	26
铜	1120	1270	酪朊胶	20	47
铁	1570	1835	聚甲基丙烯酸全氟辛酯	20	10.6
镍	1550	1925	聚全氟丙烯	20	16.2
氧化亚铁	1420	585	聚四氟乙烯	20	18.5
氧化铝	2080	700	聚氟乙烯	20	28
钠钾硅酸盐玻璃	1000	225～290	聚氯乙烯	20	39
水	20	72.7	聚偏二氯乙烯	20	40
乙醇	20	22.75	聚甲基硅氧烷	20	20.1
丙酮	20	23.7	聚乙烯	20	31
苯	20	28.9	聚苯乙烯	20	33
甲苯	20	28.4	聚乙烯醇	20	37
己烷	20	18.4	聚甲基丙烯酸甲酯	20	39
苯酚	20	40.9	聚对苯二甲酸乙二醇酯	20	43
醋酸乙酯	20	23.9	尼龙66	20	46
氯仿	20	27.1	纤维素	20	45

通常，表面张力小的物质能够很好地润湿表面张力大的物质，反之则不行。例如，油能很好地铺展在水或冰的表面，而水却不能铺展在油或带油物体的表面。

由表 1-4 可以看出，金属及无机物的表面张力远大于水和许多液体溶剂的表面张力，如果金属及无机物的表面是干净的，则很容易被它们润湿。也正因为如此，它们也容易被表面张力小的物质如油等污染。因此，对这些材料在加工和使用时要加以注意。

（2）吸水性与吸湿性

1）吸水性：多数材料由于亲水性和存在开口孔隙，都具有吸收水分的性质。材料吸水的能力称为吸水性。吸水性是材料在水中吸收水分的性质。材料的吸水性用吸水率表示，即材料吸入水的质量占材料干燥质量或材料体积的百分率。前者称质量吸水率，后者称体积吸水率。

质量吸水率　　$W_{质}=\dfrac{m_2-m_1}{m_1}\times 100\%$

体积吸水率　　$W_{体}=\dfrac{m_2-m_1}{V_0}\times\dfrac{1}{\rho_{水}}\times 100\%$

式中　m_1——材料在干燥状态下的质量（g）；

m_2——材料在饱水状态下的质量（g）；

V_0——材料的表观体积（cm^3）；

$\rho_{水}$——水的密度（4℃）（g/cm^3）。

$$W_{体}=W_{质}\times\rho_{水}$$

多数情况下，材料吸水率采用质量吸水率计算。但是也有按体积计算的，即体积吸水率。多孔材料的吸水率一般用体积吸水率来表示。体积密度小的材料，吸水性大。但是材料的吸水性还与孔隙结构有关，微细的开口孔隙，则其吸水性较强；若是闭口孔隙则水分不易渗入，粗大孔隙水分虽然容易渗入，但仅能润湿孔壁表面，而不易在孔隙内存留。所以粗大孔隙或闭口孔隙的材料，其吸水性较弱。各种材料的吸水率常在很大范围内变化，如普通混凝土为 2% ~4%，砖为 8% ~15%，花岗岩为 0.02% ~0.7%，木材和其他轻质材料的吸水率常大于 100%。

2）吸湿性：材料在潮湿空气中吸收水分的性质称为吸湿性。材料的吸湿性大小用含水率表示，即材料孔隙中所含水的质量占材料干燥时质量的百分数。材料的吸湿性是由于其孔隙内表面多分子吸附和毛细管被润湿的结果。材料在吸湿过程中降低其表面能，材料的吸湿性随着空气湿度大小变化。最终将使材料中所含水分与空气湿度相平衡，此时的含水率称为平衡含水率。材料在正常使用状态下，均处于平衡含水状态。材料的吸湿性主要与材料的组成、孔隙含量，特别是毛细孔的特征有关，还与周围环境温度、湿度有关。

材料的平衡含水率随地区和季节而不同。木材、隔热材料及其他多孔材料都具有很大的内表面，表现很强的吸湿性，这类材料在选用和储运时应考虑吸湿后对材

料体积、尺寸、强度及隔热等性能的影响。

（3）耐水性 指材料长期在饱和水作用下，保持其原有功能的能力。也就是材料长期在饱和水作用下而不被破坏，其强度也不显著降低的性质。对于结构材料，耐水性主要指强度变化，材料不同，耐水性的表示方法也不同。如建筑用涂料的耐水性常以是否起泡、脱落等来表示，而结构材料的耐水性用材料在吸水饱和状态下的抗压强度与材料在干燥状态下的抗压强度之比即软化系数 K_P 来表示。

$$K_P = \frac{R_W}{R_D}$$

式中 R_W——材料在浸水饱和状态下的抗压强度；

R_D——材料在干燥状态下的抗压强度。

软化系数（K_P）表明材料的耐水性，其值在 0～1 之间，软化系数的大小是选用材料的依据之一。通常认为 $K_P > 0.85$ 的材料是耐水的，可用在浸水或潮湿环境的重要结构物中。干燥环境可不考虑材料的 K_P 值的大小。

经常受到潮湿或水作用的结构，须选用 $K_P \geqslant 0.75$ 的材料，重要结构须选用 $K_P \geqslant 0.85$的材料。一般材料随着含水量的增加，会减弱其内部结合力，抗压强度都有不同程度的降低，即使致密的石材也不能完全避免这种影响，花岗石长期浸泡在水中，抗压强度将下降 3%，烧结普通砖和木材所受影响更为显著。

（4）抗渗性 材料抵抗压力水渗透的性质称为抗渗性。多孔材料的抗渗性可用渗透系数表示：

$$K = 10k\frac{\varepsilon\gamma^2}{\eta}$$

式中 K——多孔材料的渗透系数（m/s）；

k——常数；

ε——总孔隙率（%）；

γ——毛细孔的水力半径（nm）；

η——渗透液体的粘度（Pa·s）。

多孔材料的渗透系数与其孔径大小成平方关系，而与总孔隙率呈线性关系。这表明在其他条件相同的情况下，改善多孔材料的孔径分布对提高其抗渗性更为有效。

在工程上，还可以用下式表示材料的渗透系数：

$$K = \frac{qd}{AtH}$$

式中 K——材料的渗透系数（cm/h）；

q——渗水量（cm^3）；

d——试件厚度（cm）；

A——渗水面积（cm^2）；

t——渗水时间（h）；

H——渗水压力水头（cm）。

在建筑工程建设中的隧道、涵洞、基础、桥墩及水泥压力管等，经常承受水压的作用，在选材时其抗渗性是一个重要的技术指标。

（5）抗冻性

抗冻性是指材料在吸水饱和状态下，在多次冻融循环的作用下，保持其原有的性能，抵抗破坏的能力。对于多孔材料而言，当其处于饱和水状态下，一旦冻结，则由于水的相变而导致体积膨胀，所产生的冻胀应力将造成材料的冻害。多孔材料的冻害主要与其孔径大小和充水程度有关。材料的孔径越小，孔隙中水的冰点越低，冰晶也越小，其冻害就越小；其次是孔隙中充水程度越大，冻胀应力越大，材料的冻害也越大。材料在 -15℃以下时毛细孔中的水结冰，体积增大约 9%，对孔壁产生很大的压力，而融化时由外向内逐层进行，方向与冻结时相反，在内外层之间形成压力差和温度差，使材料出现脱屑剥落或裂纹，强度也逐渐降低。如陶瓷材料吸水饱和受冻后，最易出现脱落、掉皮等现象。材料的抗冻性用抗冻等级 Fn 表示，0 如 F_{15}表示能经受 15 次冻融循环而不破坏。水泥石孔径与冰点的关系见表 1-5。

表 1-5　水泥石孔径与冰点的关系

孔径/nm	冰晶尺寸/nm	冰点温度/℃
20.8	18.0	-2
8.3	5.8	-6
5.9	3.6	-10
4.4	2.4	-15
3.5	1.8	-20

多孔材料孔径越小，其孔隙内壁的表面张力越大，吸附性越强，孔隙中蒸汽压越低，则冰水达到平衡的冰点就越低。所以材料闭口孔隙率和开口孔率越大（特别是开口孔隙率）则材料的抗冻性越差。材料孔隙中的充水程度越高，则材料的抗冻性越差。对于受冻材料，吸水饱和状态是最不利的状态。为了提高材料的抗冻性，可在材料内部引入一定量的封闭型微孔。由于气泡的减压作用，从而缓解冻胀应力对材料的破坏作用。我国三北地区混凝土冬期施工应考虑材料的抗冻性。

3. 材料与热有关的性质

（1）导热性　热量由材料一侧传导至另一侧的性质称为导热性。材料的导热性用导热系数（λ）来表示。在稳定的单向热流传热条件下，均质材料传导的热量与传热面积、时间、两侧温差成正比，而与厚度成反比。即：

$$Q=\frac{\lambda AZ(t_1-t_2)}{a}$$

移项得到导热系数公式：

$$\lambda = \frac{Qa}{AZ(t_1 - t_2)}$$

式中 λ——导热系数［W/(m·k)］；

Q——总传导的热量（J）；

A——传热面积（m^2）；

Z——传热时间（h）；

$t_1 - t_2$——材料两侧的温差（K）；

a——材料的厚度（m）。

λ 的物理意义：单位厚度的均质材料，两侧表面温差为单位温差时，在单位时间内，通过单位面积以导热方式传递的热量。几种材料的导热系数见表1-6。

表1-6 几种材料的导热系数

名称	λ/[W/(m·K)]	名称	λ/[W/(m·K)]	名称	λ/[W/(m·K)]
铜	370	平板玻璃	0.76	晶态石英	8.97
钢	55	松木（横纹）	0.17	玻璃态石英	1.13
花岗岩	2.9	松木（顺纹）	0.35	密封空气	0.029
普通混凝土	1.28～1.51	硬质塑料	0.11～0.69	水	0.58
普通粘土砖	0.50～0.81	绝热纤维板	0.05	冰	2.32
泡沫混凝土	0.12～0.29	聚苯乙烯泡沫塑料	0.03	玻璃棉板	0.04

影响材料导热系数的因素有：材料的组成、孔隙率、孔隙尺寸、孔隙特征、表观密度、含水率及热流方向等。一般认为，金属材料、无机材料、晶体材料的导热系数 λ 分别大于有机材料、非晶体材料。

不同结构的材料，它们的导热系数差别很大，如晶体材料高于玻璃体材料。对于多孔材料，不论其结构属于晶体或玻璃体，影响其导热系数的主要是孔隙特征，如孔隙率大，其导热系数小；多孔材料的导热系数不仅与孔隙率有关，而且还取决于孔径大小和特征，在孔隙率相同条件下，孔径越小，导热系数越小；其次闭口孔隙越多，导热系数也越小。细小孔隙、闭口孔隙比粗大孔隙、开口孔隙对降低导热系数更为有利，因为减少或降低了对流传热。材料含水，会使导热系数急剧增加。材料的表观密度越大，导热系数也越大。材料吸湿后，导热系数增大，并随含水率的增高而增大，这对多孔材料更为明显。对于各向异性材料。因热流方向与纤维方向不同，如木材的顺纹导热系数大于横纹方向的。材料的导热系数随温度的升高而增大，对于处于高温或负温条件下工作的材料应考虑温度的影响。通常认为导热系数 <0.23W/(m·K) 的材料是绝热材料。绝热材料在使用和储运中应防潮防冻。

（2）热容量 材料加热时吸收热量，冷却时放出热量的性质，称为热容量。

材料加热（或冷却）时，所吸收（或放出）的热量与材料质量、温度差成正比。按下式计算：

$$Q = Cm(t_2 - t_1)$$

式中 Q——材料吸收或放出的热量（J）；

m——材料的质量（g）；

C——材料的比热容（热容量系数）[J/(g·K)]；

$t_2 - t_1$——材料加热或冷却前后的温度差（K）。

由上式可得比热容为：

$$C = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)}$$

比热容表示质量为1g的材料温度升高1K时所吸收的热量或降低1K时所放出的热量。不同材料的比热容不同，即使是同一种材料，当所处物态不同时，比热容也不同，例如水的比热容为4.186J/(g·K)，而结成冰后的比热容是2.093J/(g·K)。各种材料中水的比热容最大，材料含水率越大，比热容也越大。比热容与材料质量之积称为材料的热容量值。热容量值大的材料（如木材、木纤维材料等）能在热流变动或采暖不均衡时，缓和室内温度的波动。几种材料的比热容见表1-7。

表1-7 几种材料的比热容

名称	比热容/[J/(g·K)]	名称	比热容/[J/(g·K)]	名称	比热容/[J/(g·K)]
铜	0.38	玻璃棉板	0.88	平板玻璃	0.84
钢	0.46	绝热纤维板	1.46	密封空气	1.00
花岗岩	0.80	泡沫塑料	1.30	水	4.19
普通混凝土	0.88	普通粘土砖	0.84	冰	2.09

（3）热胀系数 大多数材料的体积都会随温度的升高而增大。这种体积的膨胀与材料质点（分子、原子）在受热后平均振幅的增大有直接关系。在非金属材料中橡胶、塑料的热膨胀性最大，尤其是热塑性树脂更为显著。材料热膨胀性的表示方法有两种。

1）体胀系数：温度每升高1K时所引起的体积相对变化，称为体胀系数，即：

$$\beta = \frac{1}{V} \times \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

式中，t 为温度。由于在一定温度范围内，β 多为常数，在实际应用中采用平均值。

2）线胀系数：温度每升高1K时所引起的线度尺寸的相对变化，称为线胀系数。即：

$$\alpha = \frac{1}{L} \times \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

式中，L 为长度。在一般情况中，多采用线胀系数 α，并简称为热胀系数。对于各向同性材料，则 $\beta \approx 3\alpha$，各向异性材料，则需用 α_1、α_2、α_3 来表示其膨胀特性。材料热胀系数是决定其热稳定性的重要因素之一。一些材料的线胀系数见表1-8。

表1-8 材料的线胀系数

名称	α/（$\times 10^{-6}K^{-1}$）	名称	α/（$\times 10^{-6}K^{-1}$）
Al_2O_3	7.8	金刚石	0.9～1.18
离子晶体 MgO	13	原子晶体 SiO_2	8
CaO	21	SiC	4.7
Al	23.6	分子晶体 I_2	93
金属晶体 Fe	11.7	尼龙	80～120
Cu	17	聚乙烯	120～180
非晶体 SiO_2	0.5	聚碳酸酯	60～70
玻璃	20		

热膨胀是材料很重要的一个性能。在产品的选材、加工、装配方面被广泛应用。例如，量具只有保持高度的尺寸稳定性才能准确，再比如金属材料在切削加工时要考虑由于切削热所引起的尺寸变化，以保证被加工制品的尺寸精度。

（4）熔点 材料由固体状态直接变为液体状态而没有经过软化过程的温度称为熔点。金属和一些塑料材料都有自己的熔点。常见金属的熔点见表1-9。

表1-9 常见金属的熔点

名称	熔点/℃	名称	熔点/℃
钨	3380	金	1063
钼	2622	铝	658
钛	1668	锌	419
铁	1538	镁	627
镍	1455	锑	631
锰	1230	碳钢	1450～1530
铜	1083	黄铜	930～980

在材料的某些加工和使用中要对材料的熔点予以考虑，例如，金属材料的铸造、焊接等，必须加热到金属的熔点以上才能实现。熔断器只有采用低熔点合金才能够安全。

（5）软化点 非晶质材料（玻璃、耐火制品、橡胶、塑料和沥青等）在加热时是逐渐软化的，当温度达到某一点时，其物理力学性能发生急剧变化的现象称为热软化，发生这种热软化的温度称为软化点。材料的软化点通常用弯曲变形、硬

度、针入度和粘度等变化来测定。这类材料加热时表现出不同的状态和性能。温度低于 T_g（玻璃化转变温度）时，材料处于如同玻璃似的状态，表现为刚性、脆性和透明性。温度高于 T_g 时，材料进入高弹状态，表现为可塑性、粘性和弹性；当温度达到 T_f（粘流温度）时，材料表现为粘度降低，变形急剧增大，此时的 T_f 点称为软化点。对非晶质材料而言，材料的使用温度应在软化点以下。

（6）耐燃性　材料抵抗火焰和高温的性能称为耐燃性。根据材料的耐燃能力可将其分为三类。

1）不燃材料：材料在火焰或高温的作用下，不发生炭化、冒烟，不燃烧和无显著的变形。如石材、陶瓷、玻璃、耐火制品、混凝土、矿物棉等均属于不燃材料。其中有一些材料在高温下不稳定，如石英晶体在 573℃时，由低温型的 β－石英转变为高温型的 α－石英时，体积膨胀会造成含石英的制品开裂或严重的变形，因此，在使用这类材料时还应考虑材料在高温下的热稳定性。

2）难燃材料：材料在高温或火焰的作用下，不产生火焰而是冒烟或焦化。当移去火源时则自动熄灭（有自熄性）。如水泥刨花板、混凝土及聚氯乙烯塑料等均属难燃材料。

3）燃烧材料：材料在火焰或高温的作用下，即能起火或吐焰，即使移去火源，仍能继续燃烧或吐焰。如木材、竹材、多数有机物等。塑料因含碳量高，燃烧时伴有黑烟，且伴随降解，故发烟量比木材大得多。为使有机材料难燃烧，可采用各种防燃和阻燃措施，如塑料制品配方中加入大量石棉、矿物粉等填料，可以明显改善可燃性，添加某些卤化物和磷化物可以阻滞燃烧：也可在易燃材料表面涂刷防火涂料，以减缓火的蔓延速度，阻止燃烧。

（7）耐火性　又称耐熔性，是指材料抵抗高热或火的作用，保持其原有性质的能力。金属材料、玻璃等虽属于不燃性材料，但在高温或火的作用下在短时间内就会变形、熔融，因而不属于耐火材料。建筑材料或构件的耐火极限通常用时间来表示，即按规定方法，从材料受到火的作用时间起，直到材料失去支持能力、完整性被破坏或失去隔火作用的时间，以 h 或 min 计。如无保护层的钢柱，其耐火极限仅有 0.25h。根据材料的耐火能力将其分为三类。

1）耐火材料：这类材料能长期经受 1580℃的高温作用而不熔化、不变形，还能承受一定载荷作用，如各类耐火制品等。

2）难熔材料：这类材料能经受 1350～1580℃的高温作用，如难熔粘土等。

3）易熔材料：这类材料不能经受 1350℃高温作用。如易熔粘土、各类长石等。

（8）耐急冷急热性　材料抵抗急冷急热的交替作用，并能保持其原有性质的能力，称为材料的耐急冷急热性，又称材料的抗热震性或热稳定性。

许多无机非金属材料在急冷急热交替作用下，易产生巨大的温度应力而使材料开裂或炸裂破坏，如瓷砖、釉面砖等。

4. 材料与声学有关的性质

（1）吸声性 指材料在空气中能够吸声的能力。当声波传播到材料的表面时，一部分声波被反射，另一部分穿透材料，其余部分则传递给材料。对于含有大量开口孔隙的多孔材料，传递给材料的声能在材料的孔隙中引起空气分子与孔壁的摩擦和粘滞阻力，使相当一部分的声能转化为热能而被吸收或消耗掉；对于含有大量封闭孔隙的柔性多孔材料（如聚氯乙烯泡沫塑料制品）传递给材料的声能在空气振动的作用下孔壁也产生振动，使声能在振动时因克服内部摩擦而被消耗掉。材料吸声性能的优劣以吸声系数来衡量，吸声系数是指材料吸收的能量与声波原先传递给材料的全部能量的百分比，吸声系数与声音的频率及声音的入射方向有关，因此吸声系数指的是一定频率的声音从各个方向入射的吸收平均值，一般采用的声波频率为125Hz、250Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz、4000Hz。一般对上述六个频率的平均吸声系数大于0.2的材料称为吸声材料。对于多孔吸声材料，其吸声效果与下列因素有关：①材料的体积密度。对同一种多孔材料，其体积密度增大，低频吸声效果提高，而高频吸声效果降低。②材料的厚度。厚度增加，低频吸声效果提高，而对高频影响不大。③材料的孔隙特征。孔隙越多越细小、吸声效果越好，若孔隙太大，则效果就差。需要指出的是，许多吸声材料与绝热材料材质相同，且都属多孔结构，但两者对孔隙特征的要求不同。绝热材料要求孔隙封闭，不相连通，这种孔隙越多，其绝热性能越好。而吸声材料则要求气孔开放，互相连通，这种气孔越多，吸声性能越好。

（2）隔声性 声波在建筑结构中的传播主要通过空气和固体来实现，因而隔声分为隔空气声和隔固体声。

1）隔空气声：透射声功率与入射声功率的比值称为声透射系数 τ，该值越大则材料的隔声性能越差。材料或构件的隔声能力用隔声量 $R\left(R=10\lg\frac{1}{\tau}\right)$来表示，与声透射系数 τ 相反，隔声量 R 越大，材料或构件的隔声性能越好。对于均质材料，隔声量符合“质量定律”，即材料单位面积的质量越大或材料的体积密度越大，隔声效果越好，轻质材料的质量较小，隔声性较密实材料差。

2）隔固体声：固体声是由于振源撞击固体材料，引起固体材料受迫振动而发声，并向四周辐射声能。固体声在传播过程中，声能的衰减极少。弹性材料如木板、地毯、壁布、橡胶片等具有较高的隔固体声能力。

1.3.2 力学性质

各种材料制成的制品，无一不在各种外力作用下使用。在外力作用下材料本身不发生显著的变形或断裂，表现为具有一定的抵抗能力。材料的这种对外力的抵抗能力称为力学性能。

1. 材料的强度

材料在外力作用下抵抗破坏的能力，称为材料的强度。材料受外力作用时，内

部就产生应力，随着外力增加，应力也相应增大，直至材料内部质点结合力不足以抵抗所作用的外力时，材料即发生破坏，此时的应力值，就是材料的强度，也称极限强度，用 F(MPa) 表示。金属所受的外力又称载荷。根据施载的方式不同可将载荷分为：

1）静载荷：大小不变或变化缓慢的载荷。

2）冲击载荷：突然增加的载荷。

3）交变载荷：大小或方向随时间变化的载荷。

在载荷作用下引起材料尺寸和形状的改变称为变形。根据变形的趋势又可以将载荷分为拉伸、压缩、剪切和弯曲等载荷。所以，材料的强度主要有抗拉强度、抗压强度、抗剪强度及抗弯强度等（图 1-2）。

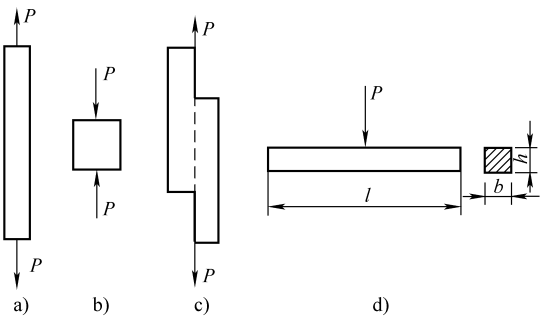


图 1-2　材料受外力作用示意图

a）抗拉　b）抗压　c）抗剪　d）抗弯

材料的力学性能是通过专门的试验测定的。主要的力学性能有强度、塑性、硬度、韧性和疲劳强度等。

材料强度一般是通过静力试验测定的，故又称为静力强度。

不同材料，强度特性是不同的，通常石材、陶瓷、玻璃、混凝土等无机材料，其抗压强度较高，而抗拉强度很低，这类材料可称为脆性材料，而多数塑料、金属、木材、竹材、石棉等材料具有较高的抗拉强度和抗压强度，这类材料又称为塑性材料。

此外，材料的强度表征还有断裂强度、剥离强度、抗冲击强度、耐磨性等。

材料的组成、结构与构造主要决定了材料的强度。不同种类材料的强度是不相同的，即使是同一种材料也因结构与构造的不同，其强度也有所差异。此外，试件的尺寸、形状、含水率、温度、表面状况、加载速率等对材料强度也有一定影响。因此，材料强度是在特定条件下测得的强度值，各国都应该用统一的标准试验方法，使材料强度具有可比性。

（1）强度　指材料在外力作用下对变形和破裂的抵抗能力。强度大小用材料单位横截面积上所产生的抵抗力，即应力来表示，应力的单位为 MPa，应力的计算

公式为：

$$R = \frac{F}{S}$$

式中　F——外力（N）；

S——横截面积（mm^2）；

R——应力（MPa）。

常用的强度测定方法是拉伸试验，用拉伸试验可以得到拉伸曲线。GB/T 228.1—2010《金属材料　拉伸试验　第 1 部分：室温试验方法》规定了拉伸试验的方法和拉伸试样的制作标准。试验时，把金属材料制作成一定形状和尺寸的试样，将拉伸试样装在拉伸试验机上，逐渐施加外力，在外力作用下，试样横截面积上承受拉伸应力，使试样伸长、变细，最后断裂。根据拉伸试验过程中外力与其相对应的变形量之间的关系，可以绘制出材料的拉伸曲线。拉伸试样及低碳钢的拉伸曲线如图 1-3 所示。

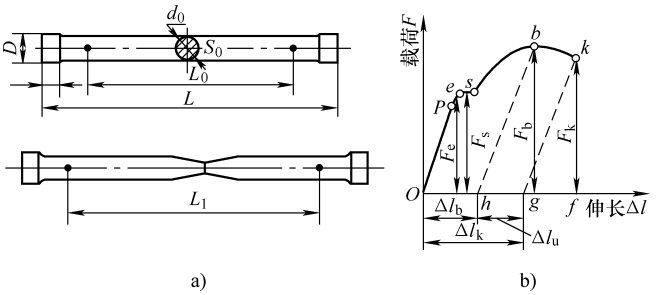


图 1-3　拉伸试样及低碳钢的拉伸曲线

a）拉伸试样　b）低碳钢的拉伸曲线

在开始段 Oe，试样的伸长量与载荷呈线性关系，卸载后试样将恢复至原长，这一阶段的变形称为弹性变形。载荷超过 F_e 后，试样的变形中出现永久变形，这种变形称为塑性变形。当载荷增大到 F_s 后，载荷不增加或变化不大，试样仍继续伸长，出现了明显的塑性变形，这种现象称为屈服现象。s 点被称为屈服点，屈服后试样产生均匀的塑性变形。当载荷超过 F_b 后，试样产生非均匀的塑性变形，到 k 点时试样发生断裂。

试样经历了这三个特性曲线阶段的变化，由此可以确定拉伸时的几个强度指标。

1）弹性极限：当外力为零时，变形量也为零。当开始施加外力时，试样被伸长，如果去除外力，变形消失，试样恢复原状，金属的这一变形称为弹性变形。曲线 Oe 所对应的变形为弹性变形阶段。e 点所对应的变形量是试样弹性变形的最大限度。在弹性变形范围内金属材料单位面积上所能承受的最大应力称为弹性极限，用 σ_e 表示，即：

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0}$$

式中　F_e——最大弹性变形时的外力（N）；

S_0——试样原始横截面积（mm^2）；

σ_e——弹性极限（MPa）。

2）屈服强度：当外力增加到 F_s 时则拉伸曲线出现 *es* 水平线段。它说明外力不再增加，但试样本身变形仍继续，这种外力不增加而变形继续进行的现象叫屈服。如果试样产生屈服后，将外力消除，试样长度部分恢复，但不能恢复到原来长度，有一部分变形被保留下来，这一变形称为塑性变形。屈服现象是材料由弹性变形向塑性变形转变的标志。材料产生屈服现象时的应力称为屈服强度，可用 R_e 表示，即：

$$R_e = \frac{F_s}{S_0}$$

式中　F_s——屈服时的外力（N）；

S_0——试样原始横截面积（mm^2）；

R_e——屈服强度（MPa）。

屈服强度分为上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL}。上屈服强度 R_{eH} 为试样发生屈服而应力首次下降前的最大应力；下屈服强度 R_{eL} 为在屈服期间，不计初始瞬间效应时的最小应力。

3）抗拉强度：对于无明显屈服（不连续屈服）的金属材料，相应试验期间的最大力 F_m 对应的应力称为抗拉强度，用 R_m 表示，即：

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

式中　R_m——试样拉断前承受的最大载荷（N）；

S_0——试样原始横截面积（mm^2）；

F_m——抗拉强度（MPa）。

以上强度指标是设计和使用材料的重要依据。机械零件和工具的使用应力只能限制在弹性变形范围内，即小于弹性极限 σ_e。若超过其屈服强度会引起明显的变形，导致机械零件和工具的损坏。若大于抗拉强度则会发生断裂，造成事故，这是绝对不允许的。

（2）塑性　指材料在外力作用下产生塑性变形而不破裂的能力。常用的塑性指标有延伸率和断面收缩率，通过拉伸试验可以求得，如图 1-3 所示，试样由开始变形到拉断，其长度由原标距长度 L_0 伸长到 L_1，横截面积由 S_0 缩小到 S_1。

1）延伸率：试样拉断后标距的伸长量与试样原始标距长度之比，用 A 表示，即：

$$A=\frac{L_1-L_0}{L_0}\times 100\%$$

式中 L_0——试样原始标距长度（mm）；

L_1——试样拉断后的标距长度（mm）。

2）断面收缩率：试样拉断后缩颈处横截面积的缩减量与试样原始横截面积之比。用 Z 表示，即：

$$Z=\frac{S_0-S_1}{S_0}\times 100\%$$

式中 S_0——试样原始横截面积（mm^2）；

S_1——试样拉断后缩颈处横截面积（mm^2）。

延伸率 A 和断面收缩率 Z 对金属材料来说是两个重要的塑性指标，它反映了金属材料塑性变形的能力大小。A 和 Z 的值越大，金属材料的塑性越好。反之，塑性就越差，相应脆性也越大。一般认为，$A>5\%$ 的材料为塑性材料，而 $A<5\%$ 的材料为脆性材料。大多数机械零件除要求一定强度指标外，还要求一定的塑性指标，这是因为：

① 当零件遭受意外过载或冲击时，由于塑性变形而不至于突然断裂。

② 材料具有一定的塑性可以保证对于变形量要求较大的零件或制品的加工，如锻造、轧制，特别是深冲加工的顺利进行。

（3）硬度 材料抵抗变形，特别是压痕或划痕形成的永久变形的能力。任何制品、零件和工具都应具备适当的硬度才能保证其使用性能和寿命。硬度的表示方法有布氏硬度（HBW）、肖氏硬度（HS）、洛氏硬度（HR）、维氏硬度（HV）、邵氏硬度（HD、HA）和莫氏硬度，由于测试硬度的方法不同，所以表示材料的硬度就不同，硬度按测定原理可分为压痕硬度、冲击硬度、刻痕硬度、回弹硬度及显微硬度等。布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度都用钢球压入法测定试样，钢材、木材、混凝土、矿物材料等多采用此法，但石材有时也用刻痕法（又称莫氏硬度）测定；莫氏硬度、邵氏硬度通常用压针法测定试样，非金属材料及矿物材料一般也用此方法测定。矿物硬度通常以莫氏硬度表示，莫氏硬度分成10级，见表1-10。

表1-10 莫氏硬度表示法

等级	标准矿物	等级	标准矿物
1	滑石 $Mg_3(SiO_4)(OH)_2$	6	正长石 K（Si_3AlO_8）
2	石膏 $CaSO_4\cdot 2H_2O$	7	石英 SiO_2
3	方解石 $CaCO_3$	8	黄玉 $Al_2(SiO_4)(F\cdot OH)$
4	萤石 CaF_2	9	刚玉 Al_2O_3
5	磷灰石 $Ca_5(PO_4)_3F$ 或 $Ca_5(PO_4)_3Cl$	10	金刚石 C

对于金属碳化物、氧化物的陶瓷等材料，常用显微硬度表示。

由于硬度试验方法简便，不需专门试样，因此硬度常作为检测材料质量的方法之一。下面介绍几种常用硬度的测定原理。

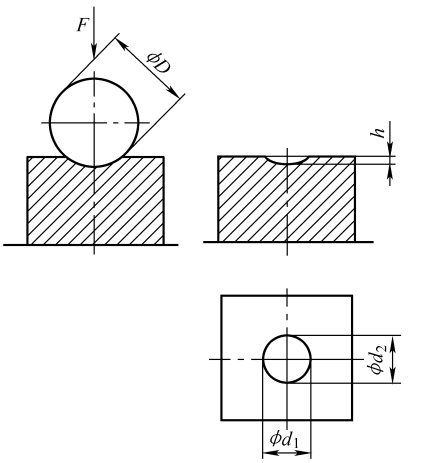


图 1-4　布氏硬度测定原理示意图

1）布氏硬度：布氏硬度的测定是按 GB/T 231.1—2009《金属材料布氏硬度试验第 1 部分：试验部分》进行，测定原理如图 1-4 所示。对一定直径的硬质合金球施加试验力压入试样表面，保持规定的时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕的直径：布氏硬度与试验力除以压痕表面积的商成正比。压痕被看做是具有一定半径的球形，压痕的表面积通过压痕的平均直径和压头的直径计算得到。根据表面压痕的直径计算出压痕球缺的面积，最后求出压痕单位面积上承受的平均压力，作为被测金属材料的布氏硬度值，用 HBW 表示。

$$\mathrm{HBW} = 常数 \times \frac{试验力}{压痕表面积} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中　F——试验力（N）；

D——硬质合金球直径（mm）；

d——压痕平均直径（mm），$d = \dfrac{d_1 + d_2}{2}$。

布氏硬度通常不标注单位。表示方法为布氏硬度值 + HBW + 硬质合金球直径 + 施加的试验力对应的 kgf 值 + 试验力保持时间。例如，350HBW5/750 表示用直径为 5mm 的硬质合金球在 7.355kN 试验力下保持 10 ~ 15s（保持时间为 10 ~ 15s 不加标注）测定的布氏硬度值为 350；600HBW1/30/20 表示用压头直径 1mm 的硬质合金球在 294.2N 试验力下保持 20s 测定的布氏硬度值为 600。

测量布氏硬度采用的试验力大，球体直径也大，因而压痕直径也大，所以能较准确地反映出金属材料的平均性能。另外，由于布氏硬度与其他力学性能（如抗拉强度）之间存在着一定的近似关系，因而在工程上得到广泛应用。适合测定灰铸铁和轴承合金等具有粗大晶粒或者粗大组成相的材料硬度。

测量布氏硬度的缺点是操作时间较长，对不同材料需要不同压头和试验力，压痕测量较费时；在进行高硬质材料试验时，由于球体本身的变形会使测量结果不准确。因此，用硬质合金球压头时，材料硬度值必须小于 650。布氏硬度试验法又因其压痕较大，不宜用于测量成品及薄壁件，以及大批量生产的逐件检验的情况。

2）洛氏硬度：洛氏硬度测定原理如图 1-5 所示，是在初负荷 F_0 及总负荷 F 分别作用下，将金刚石圆锥体或钢球压入金属表面，用压入深度来衡量硬度的大小。如果金刚石圆锥体或钢球压入的深度越深，则被测金属的硬度就越低，反之，则越高。

根据 h 值及常数 N 和 S（表 1-11），用下式计算洛氏硬度：

$$\text{洛氏硬度} = N - \frac{h}{S}$$

洛氏硬度的符号用 HR 表示。根据压头和总负荷的不同，洛氏硬度有 A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 等标尺，具体见表 1-12。

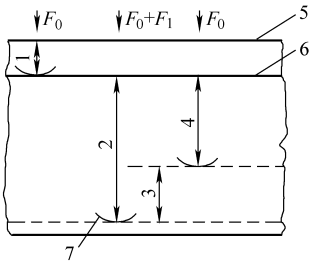


图 1-5 洛氏硬度测定原理示意图

1—在初试验力 F_0 下的压入深度
2—由主试验力 F_1 引起的压入深度
3—卸除主试验力 F 后的弹性回复深度
4—残余压入深度 5—试样表面
6—测量基准面 7—压头位置

表 1-11 符号及名称

符 号	说 明	单 位
F_0	初试验力	N
F_1	主试验力	N
F	总试验力	N
S	给定标尺的单位	mm
N	给定标尺的硬度数	
h	卸除主试验力，在初试验力下压痕残留的深度（残余压痕深度）	mm
HRA HRC HRD	洛氏硬度 $= 100 - \frac{h}{0.002}$	
HRB HRE HRF HRG HRH HRK	洛氏硬度 $= 130 - \frac{h}{0.002}$	
HRN HRT	表面洛氏硬度 $= 100 - \frac{h}{0.001}$	

表 1-12　洛氏硬度标尺

洛氏硬度标尺	硬度符号④	压头类型	初试验力 F_0/N	主试验力 F_1/N	总试验力 F/N	适用范围
A①	HRA	金刚石圆锥	98.07	490.3	588.4	20～88HRA
B②	HRB	直径 1.5875mm 球	98.07	882.6	980.7	20～100HRB
C③	HRC	金刚石圆锥	98.07	1373	1471	20～70HRC
D	HRD	金刚石圆锥	98.07	882.6	980.7	40～77HRD
E	HRE	直径 3.175mm 球	98.07	882.6	980.7	70～100HRE
F	HRF	直径 1.5875mm 球	98.07	490.3	588.4	60～100HRF
G	HRG	直径 1.5875mm 球	98.07	1373	1471	30～94HRG
H	HRH	直径 3.175mm 球	98.07	490.3	588.4	80～100HRH
K	HRK	直径 3.175mm 球	98.07	1373	1471	40～100HRK
15N	HR15N	金刚石圆锥	29.42	117.7	147.1	70～94HR15N
30N	HR30N	金刚石圆锥	29.42	264.8	294.2	42～86HR30N
45N	HR45N	金刚石圆锥	29.42	411.9	441.3	20～77HR45N
15T	HR15T	直径 1.5875mm 球	29.42	117.7	147.1	67～93HR15T
30T	HR30T	直径 1.5875mm 球	29.42	264.8	294.2	29～82HR30T
45T	HR45T	直径 1.5875mm 球	29.42	411.9	441.3	10～72HR45T

如果在产品标准或协议中有规定时，可以使用直径为 6.350mm 和 12.70mm 的球形压头。

① 试验允许范围可延伸至 94HRA。

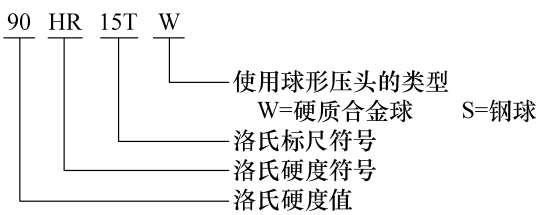
② 如果在产品标准或协议中有规定时，试验允许范围可延伸至 10HRBW。

③ 如果压痕具有合适的尺寸，试验允许范围可延伸至 10HRC。

④ 使用硬质合金球压头的标尺，硬度符号后面加“W”。使用钢球压头的标尺，硬度符号后面加“S”。

洛氏硬度的表示方法如下：

例如：



洛氏硬度测定简便，能直接从刻度盘上读出硬度值，压痕较小，可测定成品件及较薄零件的硬度。但由于压痕小，故准确性低于布氏硬度。一般同一试件应测三点以上，取其平均值。

3）维氏硬度：维氏硬度试验按 GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法》进行，试验测定原理如图1-6所示。

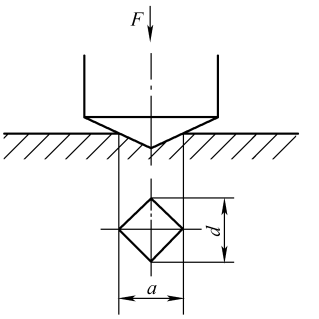


图1-6 维氏硬度测定原理图

将顶部两相对面具有规定角度的正四棱锥体金刚石压头用一定的试验力压入试样表面，保持规定的时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕对角线的长度，则试验力除以压痕表面积的商为维氏硬度值HV。

$$\text{维氏硬度 HV} = \text{常数} \times \frac{\text{试验力}}{\text{压痕表面积}}$$

$$= 0.102 \frac{2F\sin\frac{136°}{2}}{d^2} \approx 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

式中 F——试验力（N）；

d——压痕对角线平均值（mm）。

通过测定压痕表面的对角线平均长度 a 和 d 的算术平均值来计算维氏硬度的面积 S。通常省略维氏硬度值的单位（MPa）。维氏硬度的表示方法：硬度值 + HV + 压力 + 保持时间，例如，640HV30/20 表示在试验力为 299.2N（30kgf）作用下保持 20s 测定的维氏硬度为 640。维氏硬度试验由于试验力小，而且调整的范围宽，故可以测定极软到极硬的材料，同时还用于测定布氏硬度和洛氏硬度所不能测的薄零件、薄硬化层、镀层等。所测硬度可直接比较其大小，不需换算。

用各种硬度法测得的硬度值不能直接进行比较，必须通过专门的硬度换算表，换算成同一硬度后，方能比较其大小。

（4）冲击韧性 有些材料在静载荷作用下，表现为较高的强度，但在冲击载荷的作用下，却表现非常脆弱；相反的，也有些材料，强度并不高，但在冲击载荷作用下，反而表现出很高的韧性。所谓韧性就是材料在冲击载荷作用下对破裂的抵抗能力。材料的韧性大小可通过冲击试验测定。

摆锤式一次冲击试验如图1-7所示，它是将重力为 G 的摆锤由一定高度 H 落下，打断带缺口的标准试样，随转的指针指示出摆锤回升的高度 A，由于摆锤打断试样，对试样作了功，消耗了部分能量，根据能量守恒定律，摆锤所消耗的这部分能量，被试样所吸收。材料的韧性大小用试样缺口处单位面积上所吸收的冲击能量，即冲击韧度值（简称冲击值）表示。

冲击韧度 a_K：

$$a_K = \frac{A_K}{S}$$

式中 S——试样缺口处横截面积（cm^2）；

a_K——冲击韧度（J/cm^2）；

A_K——消耗在试样上的冲击吸收功（J）。

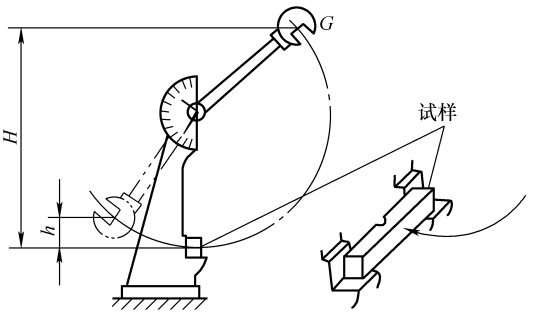


图 1-7　冲击试验原理图

冲击韧度 a_K 只能作为承受大能量冲击的零件的抗力指标，但是处于这种工作条件的零件甚少。在实践中，冲击韧度 a_K 多用于判断材料的性质（如脆性材料、韧性材料）及控制冶炼、压力加工、热处理等产品的质量。同时也常用于测定金属材料由韧性向脆性转化的温度，这对在寒冷条件下工作的零件极为重要，以防脆性断裂。图 1-8 所示为 a_K 与温度的关系曲线。

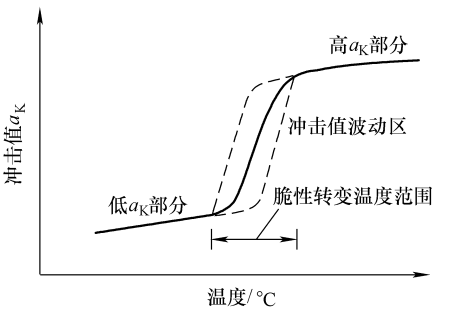


图 1-8　a_K 与温度的关系曲线

冲击韧度 a_K 对于承受小能量多次冲击抗力很不适用。实践证明，小能量多次冲击抗力不仅取决于金属材料的韧性，同时主要取决于材料的强度。例如对于锻锤锤杆，利用牺牲韧性和适当提高强度的处理方法，使锤杆寿命大大提高。

（5）疲劳及疲劳强度　材料在低于屈服强度的交变应力作用下发生破裂的现象称为疲劳。为防止机器零件的疲劳断裂，在成批生产之前，对机器的重要零件，例如汽车上的连杆、钢板弹簧、齿轮等需作疲劳试验，以保证使用的可靠性。材料的疲劳抗力可用图 1-9 所示应力与应力循环次数之间的关系曲线，即疲劳曲线加以说明。

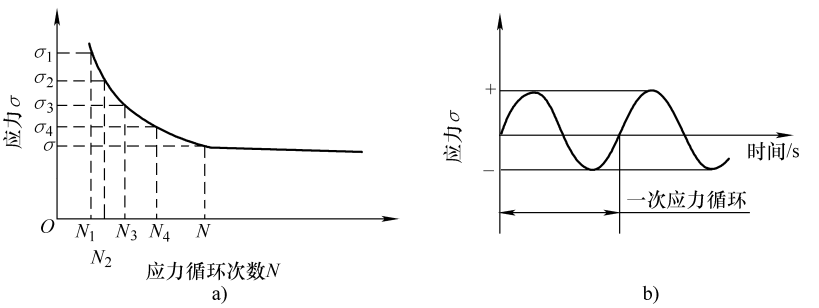


图 1-9　疲劳曲线

a）$\sigma - N$ 曲线　b）对称循环交变应力

图1-9a为$\sigma-N$曲线，当金属材料承受较大应力σ_1时，应力循环了较少的次数N就发生了断裂。降低交变应力，循环次数增加，如σ_2对应N_2，σ_3对应N_3等。从曲线上可以看出，当应力降到一定值时，曲线为一条水平线，它说明在该应力作用下，循环次数可以是无限的。因此，若应力再降低；循环次数更是无限的。所谓疲劳强度是指金属材料承受无限次交变载荷作用而不破裂的最大应力。对称应力作用下的疲劳强度用σ_{-1}表示，如图1-9b所示，此时应力大小及方向都变化。

实际上，无限次交变载荷试验是办不到的，一般规定，对黑色金属10^7次，有色金属和不锈钢10^8次而不断裂的最大应力称为疲劳强度。

机器零件的疲劳断裂具有很大的危险性，常造成事故，必须引起足够的重视。疲劳的实质，主要是由于金属材料的表面粗糙或内部夹杂等缺陷起到疲劳裂纹源的作用，在交变应力作用下逐渐扩展导致断裂的。因此，对零件表面精细加工、喷丸强化、表面热处理及合理选材都会有效地提高疲劳强度。

（6）材料的标号　对于以强度为主要指标的材料，通常按材料强度值的高低划分成若干等级，称为强度等级（如混凝土、砂浆等用“强度等级”来表示）。有的材料则用“标号”表示（如水泥等），标号是材料实用的经济技术指标，标号的大小根据强度值来确定。脆性材料主要以抗压强度来划分。塑性材料和韧性材料主要以抗拉强度来划分。

无机非金属材料（如水泥、砖石、混凝土等）通常依据其抗压强度值大小，将其划分为若干个不同的强度等级，如我国水泥的强度等级，硅酸盐水泥分为42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、65.5R六个强度等级。普通硅酸盐水泥的强度等级分为42.5、42.5R、52.5、52.5R四个等级。矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥的强度等级分为32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R六个等级。

尽管各种材料的标号有不同的含义，但掌握材料标号对了解材料性能，合理选用材料以及储运都是十分重要的。

（7）比强度　比强度是材料强度与体积密度的比值。其值等于材料强度与其表观密度之比（MN·m/kg）。比强度是衡量材料轻质高强性能的一项重要指标，比强度越大，则材料的轻质高强性能越好。比强度较高的材料就意味着可以减少本身自重，这对于高速运行的飞机、火车等是非常重要的。减少自重就能导致效率的提高和能量的节省。常用的碳素钢比强度为0.051，松木（顺纹）为0.069，玻璃钢为0.225，普通混凝土仅为0.017。

（8）耐磨性　材料受摩擦作用其质量和体积减小的现象称为磨损。磨损是工业领域和日常生活中常见的现象，它是造成材料和能源损失的一个重要原因。磨损问题涉及的范围很广，例如产品制造过程中刀具和模具的磨损以及各零部件在使用过程中的磨损，以及因磨损而引起的零件状态与功能发生的变化等。因此研究材料的磨损具有重要意义。

耐磨性是指材料表面抵抗磨损的能力。耐磨性用磨损率（N）表示，可用下式计算：

$$N=\frac{m_1-m_2}{A}$$

式中　N——材料的磨损率（g/cm^2）；

m_1、m_2——材料磨损前、后的质量（g）；

A——试件受磨面积（cm^2）。

N 反映了材料表面抵抗磨损的能力，即耐磨性大小。材料的耐磨性与硬度、强度及材料的内部构造有关，材料的硬度越高，则材料的耐磨性越高，材料的磨损率有时也用磨损前后的容积损失来表示；材料的耐磨性有时也用耐磨次数来表示。机械设备中高速旋转的轴、建筑工程中地面、路面、楼梯踏步及其他受较强磨损作用的部位等，都需选用具有较高硬度和耐磨性的材料。

2. 材料的变形性能

（1）弹性变形和塑性变形

1）弹性：材料在外力作用下形状和体积发生变化而产生变形，当外力不超过一定限度时，外力取消后变形即行消失，材料能够完全恢复到原来形状的性质，称为材料的弹性。这种完全恢复的变形，称为弹性变形。材料的弹性变形曲线如图 1-10 所示，材料的弹性变形与载荷成正比。

材料在外力作用下产生变形，当外力过大超过一定限度时，在外力取消后，只能部分复原，而遗留下一部分不能恢复的变形，这种不可恢复的变形称为塑性变形，也称残余变形或永久变形。

钢材在弹性极限内接近于完全弹性材料，其他材料多为非完全弹性材料。这种非完全弹性材料在受力时，弹性变形和塑性变形同时产生，如图 1-11 所示，外力取消后，弹性变形 ab 可以消失，而塑性变形 Ob 不能消失。具有这种性质的材料称为塑性材料，如低碳钢、铝合金、青铜、黄铜、木材、沥青等。

实际上，不少材料在外力作用下，弹性变形和塑性变形同时产生，如图 1-11 所示，ab 段为弹性变形，bO 段为塑性变形。

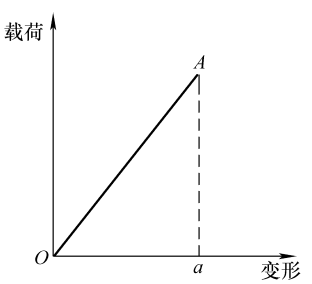


图 1-10　材料的弹性变形曲线

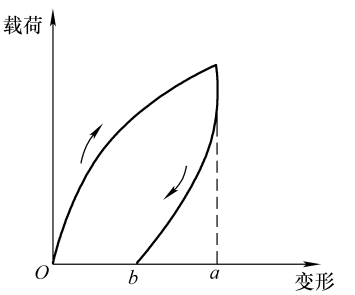


图 1-11　材料的弹塑性变形曲线

2）脆性：指材料受力达到一定程度后突然破坏，而破坏时并无明显塑性变形的性质。具有此种性质的材料称为脆性材料，脆性材料的变形曲线如图1-12所示，其特点是材料在接近破坏时，变形仍很小。混凝土、玻璃、砖、石材及陶瓷和铸铁等属于脆性材料。它们抵抗冲击作用的能力差，但是抗压强度较高。反之，材料在破坏前有显著的塑性变形的性质称为塑性。

3）韧性：指材料在冲击、振动荷载的作用下，材料能够吸收较大的能量，同时也能产生一定的变形而不致破坏的性质。用作桥梁地面、路面及吊车梁等材料都要求具有较高的抗冲击韧性。

（2）粘性

1）粘性流动：指材料在一定剪切应力作用下，以一定的变形速度进行流动，但这种变形是在外力除去后仍不能恢复的变形。图1-13中的直线①表示切应力与切应变呈线性关系，具有这种关系的材料称为牛顿粘性液体。它是指这样一种理想的粘性液体，其切应力（τ）与切应变（γ）之比为一常数，此常数称为粘性系数（η）。其流变方程为：

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

式中 τ——切应力（Pa）；

$\dot{\gamma}$——切应变 $d\gamma/dt$；

η——粘性系数（Pa·s）。

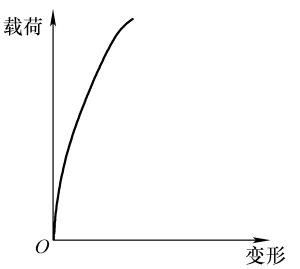


图1-12 脆性材料的变形曲线

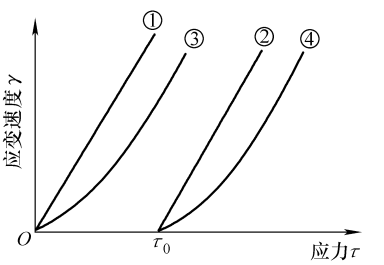


图1-13 材料的流变曲线

①—牛顿液体 ②—宾汉液体

③—非牛顿液体 ④——般宾汉液体

粘性系数（η）表示粘性液体内部结构阻碍流动的系数。图1-13中直线②表示在硅藻土、陶土、涂料等粘弹和粘塑物体的变形过程中，当所施加的外力较小，它所产生的切应力小于极限切应力（或屈服应力 τ_0）时，物体保持原状不发生流动。而当切应力超过 τ_0 时，物体就发生流动变形。这类物体称为宾汉液体，其流变方程为：

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$$

式中 τ——切应力（Pa）；

$\dot{\gamma}$——应变 $d\gamma/dt$；

η——粘性系数（Pa · s）。

此外，由于分散体系中粒子的形状不同，性质不同，故牛顿粘性液体及宾汉液体也有 τ 与 γ 之间不存在直线关系的情况，如图 1-13 中曲线②、④所示。一般悬浮体及溶胶的流变曲线常是图 1-13 中①或③。而凝胶的流变曲线则常为图 1-13 中②或④，但在振动等切应力作用下产生触变后，即转变为图 1-13 中曲线①或③。实际使用的材料，通常同时具有弹性、塑性及粘性，是介于弹、塑、粘性物体之间的非均质体。只不过是在某种条件下某种性能表现得比较突出而已。一些实验表明：沥青混凝土、塑料、橡胶等材料的变形包括弹性变形和粘性变形两部分。沥青混凝土路面被压出的轮胎痕迹就是粘性流动的实例。玻璃、金属及其他材料在高温下也会有粘性流动的现象。

2）蠕变与松弛：材料的应力与应变关系随时间的推移有着显著的变化。这表明材料的复杂力学行为。当材料在长期不变的外力作用下，变形随时间而增加，这种现象称为蠕变。固体材料蠕变现象是由于材料中某些非晶体物质，具有类似于液体的粘性流动而造成的，而晶体材料的蠕变则是由于在剪切应力作用下，引起晶格错动或滑移而造成的。

材料的蠕变发展与其所受应力有关，当应力小于某一极限值时，蠕变发展随着时间的增长而减小，最后材料变形停止，见图 1-14 中的曲线①。而当应力接近（或超过）某一极限值时，蠕变发展随时间而增大，最后导致材料破坏，见图 1-14 中的曲线②。材料的蠕变还与环境的温度有关，如石材、混凝土等材料，它们的蠕变量随着温度的增加而加剧；金属材料在高温下的蠕变随温度的变化也特别显著。

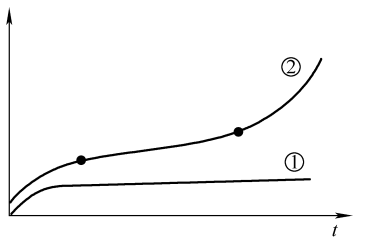


图 1-14　材料的蠕变曲线

材料在长期外力作用下，如总的变形不变，而塑性变形增加，弹性变形减小，因而引起弹性应力随时间的增加而逐渐衰减的现象称为应力松弛，它是粘弹性的另一种表现。例如密封管道的法兰橡胶垫片，时间长了要产生渗漏现象，就是由应力松弛引起的。应力松弛的机理也是由于在外力的作用下聚合物大分子链产生位错和构象的改变所造成的。应力松弛使材料在变形中储存的弹性功转变为热而逐渐消失，故弹性应力逐渐降低。

（3）弹性模量　材料在弹性变形阶段，其应力与应变呈线性弹性关系。胡克定律描述了这种线性弹性关系。

1）单向拉伸或压缩时胡克定律表示如下：

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

式中　E——弹性模量（MPa）；

σ——正应力（MPa）；

ε——正应变。

2）单纯剪切时胡克定律表示如下：

$$\tau = G \cdot \dot{\gamma}$$

式中 G——剪切模量；

τ——切应力；

$\dot{\gamma}$——切应变。

拉伸或压缩时试件的横向和伸长收缩关系为：

$$\mu = \left| \varepsilon_{横向} / \varepsilon_{纵向} \right|$$

式中 μ——泊松比。

材料的 E、G、μ 之间存在着以下关系：

$$E = 2(1 + \mu) G$$

对于各向同性材料，如陶瓷等多晶体材料，只要知道两个弹性常数，即可按上式算出第三个常数。弹性模量 E 是使材料产生单位弹性应变所需的应力。E 实际上反映了材料产生弹性变形的阻力大小。在工程上弹性模量是材料刚性的表征参数。材料的弹性模量值主要决定其化学键类型，具有原子晶体的材料，其弹性模量值高；相反具有分子晶体的材料，其弹性模量值低。材料的熔点也取决于固体中粒子间的键合强度。一些材料的弹性模量、熔点和键型见表 1-13。

表 1-13 一些材料的弹性模量、熔点和键型

名称	弹性模量 E/GPa	熔点 T_m/℃	键型
低碳钢	210	1535	金属键
铝	69	660	金属键
金刚石	1140	3800	共价键
刚玉	400	2050	共价键和离子键
石英玻璃	70	$T_g \sim 1150$	共价键和离子键
聚苯乙烯（非晶质）	3	$T_g \sim 100$	分子键

3. 材料的断裂

（1）脆性断裂与塑性断裂 材料在外力作用下分成若干部分的现象称断裂。断裂几乎是材料在外力作用下变形发展阶段的最后阶段，因此研究断裂规律不仅具有重要的科学意义，而且也有很大的实际意义。

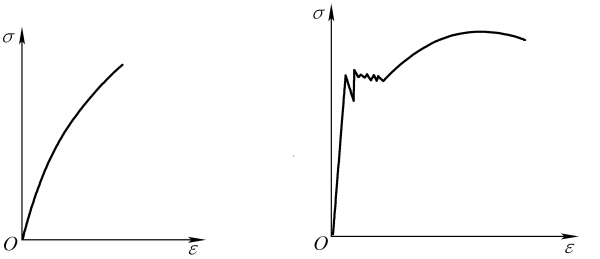
任何断裂都有一个过程，包括裂纹的萌生（或原来就存在各种裂纹状的缺陷）、扩展，一直到裂纹扩展到临界尺寸而导致最后完全断裂。

根据断裂前是否存在明显的宏观塑性变形，可将断裂分为两种类型：脆性断裂和塑性断裂（也称韧性断裂）。

脆性断裂的特征是断裂前不发生明显的宏观塑性变形，即断裂发生在弹性阶段，如图 1-15a 所示。事实上，绝对的脆性断裂（在微观上为纯解理断裂）是少见的，因为断裂前总归伴随很少的塑性变形。习惯上根据材料在常温静载下、拉伸

试验测定的延伸率 A 来区分材料是脆性断裂还是塑性断裂。时至今日对于 A 的数值并没有严格的规定。有些国家将 $A<10\%$，称为脆性断裂。

塑性断裂的特征是断裂前有明显的宏观塑性，金属塑性断裂的断口呈纤维状、发暗、有塑性变形的痕迹。典型塑性材料的拉伸应力应变曲线如图 1-15b 所示。



a)　　b)

图 1-15　材料的拉伸应力应变曲线

a）脆性材料　b）塑性材料

脆性断裂往往是导致结构灾难性事故的直接原因。20 世纪 60 年代兴起的断裂力学为材料抵抗脆性断裂提供了理论、方法和指标，材料的断裂韧度 K_{IC} 表征了材料抵抗脆性断裂的能力，一些材料的断裂韧度值见表 1-14。

表 1-14　一些材料的断裂韧度值（K_{IC}）

材料	K_{IC}/(MPa $\sqrt{m}$)	材料	K_{IC}/(MPa $\sqrt{m}$)
低碳钢	200	有机玻璃	1 ~ 1.4
Si_3N_4 陶瓷	3.72 ~ 4.65	木材（横纹）	0.47 ~ 0.9
SiC 陶瓷	2.79	木材（纵纹）	1.1 ~ 1.4
Al_2O_3 陶瓷	2.79 ~ 4.65	素混凝土	1 ~ 2
水泥	0.2	聚丙烯	3
普通玻璃	1 ~ 1.4	尼龙	3

（2）准脆性断裂　近代的材料学者指出水泥基混凝土复合材料、石料和陶瓷等均属于准脆性材料。

众所周知，混凝土是一种多相非均质材料。用刚性位移控制的加载方式可获得混凝土的全拉伸曲线，如图 1-16 所示。

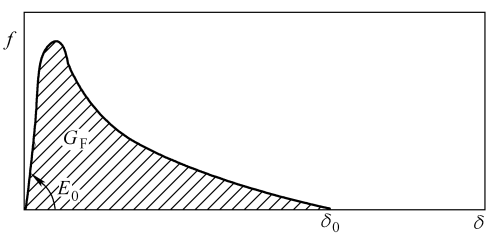


图 1-16　混凝土的全拉伸曲线

对比图1-15a和b可以很明显地看到塑性材料与混凝土材料的拉伸应力应变有明显的区别。第一，在应力达到峰值前，塑性材料有较长的塑性变形阶段，而混凝土没有；第二，应力到达峰值后，塑性材料很快发生断裂，而混凝土有一段很长的下降段。从能量观点来分析，塑性材料的能量主要耗散在上升段，而混凝土能量主要耗散在下降段。

形成混凝土下降段的主要原因是由于在拉伸过程中，混凝土在其最薄弱的地方（含有较多界面裂纹或孔隙等）形成了由微裂纹组成的损伤区，在损伤区由于骨料的咬合作用而能部分传递拉应力，由图1-16中的斜线部分所构成的面积称为断裂能 G_F，它定义为在材料断裂时单位面积所吸收的能量。G_F 可以认为是一个材料参数，也表征材料抵抗断裂的能力。

（3）疲劳断裂　材料在交变载荷多次反复作用下发生的断裂称为疲劳断裂。金属材料和非金属材料都可以发生疲劳断裂。疲劳断裂时的应力一般都远低于静载下的强度极限乃至屈服极限。疲劳断裂也没有明显的塑性变形，但在断口上有明显的裂纹扩展的条带。疲劳断裂有裂纹萌生、扩展和最终断裂三个基本阶段。对于高周疲劳（断裂前的循环数 $N_f \geqslant 10^4$ 次）构件的寿命主要由裂纹萌生寿命控制；对于低周疲劳（断裂前的循环数 $N_f < 10^4$ 次），其疲劳寿命主要受扩展寿命控制。材料内部的缺陷，如夹杂物、空洞、偏析等是产生疲劳裂纹源的区域，还有结构的应力集中区也是萌生裂纹源的地方。在交变载荷作用下，疲劳裂纹由萌生到扩展，其扩展速率取决于材料自身的组织结构和应力水平。当裂纹扩展所剩余的断面面积不足以承受所施加的载荷时，就迅速扩展而断裂，并在疲劳断口上留下最终断裂区。材料抵抗疲劳断裂的能力用旋转弯曲试验的疲劳极限 σ_{-1} 来表示，几种常用材料的疲劳极限见表1-15。

表1-15　几种常用材料的疲劳极限值

材料	σ_{-1}/MPa	材料	σ_{-1}/MPa
25钢（正火）	180	聚苯乙烯	10
45钢（正火）	280	聚酯	16
40CrNiMn（调质）	540	尼龙66	1.4
聚乙烯	12		

（4）蠕变断裂（静载延滞断裂）　蠕变是在固定载荷作用下，随着时间的增长，材料变形不断发展，直至断裂。不同材料产生蠕变的条件不同。对于陶瓷材料，当温度高于（0.4～0.5）T_m 时产生蠕变；聚合物材料发生蠕变的温度与其玻璃化温度有关，许多聚合物材料在室温下就可观察到明显的蠕变；金属材料当温度高于（0.3～0.4）T_m 时，则产生明显的蠕变。非晶态固体材料（玻璃）在恒定载荷作用下，会持续地产生变形。其蠕变速度和蠕变量都是应力、温度和材料性能的函数。高温下由于引起粘性流动和扩散过程加快，因此，蠕变随温度升高而增加。

应力增大，蠕变也加快。

1.3.3 耐久性

工程材料长期抵抗各种内外破坏因素或腐蚀介质的作用，保持其原有性质的能力称为工程材料的耐久性。工程材料的耐久性是工程材料的一项综合性质，一般包括耐磨性、耐水性、耐热性、耐光性、抗老化性、耐蚀性、耐沾污性等。工程材料的组成和性质不同，所处的工作环境不同，所制成的部件的重要性不同，则对工程材料耐久性项目及耐久性时间的要求也不同。如在潮湿环境下工作的材料则要求材料具有一定的耐水性；北方地区在室外工作或使用的材料须具有一定的抗冻性和耐光性；地面用的装饰材料须具有一定的硬度和耐磨性。耐久性寿命的长短是相对的，如花岗石要求其耐久性寿命为数十年至数百年以上，而对质量好的外墙涂料则要求其耐久性寿命为 10 ~ 15 年。

1. 影响工程材料耐久性的主要因素

（1）外部因素　是影响耐久性的主要因素，外部因素主要有：

1）化学作用，包括环境中及工作时接触的各种酸、碱、盐及其水溶液，还有大气中各种腐蚀性气体，对工程材料都有化学腐蚀作用。

2）物理作用，包括光、热、电、温度差、湿度差、干湿循环、冻融循环、溶解等，可使材料的结构发生变化，如内部产生微裂纹或孔隙率增加。

3）生物作用，包括菌类、昆虫等，可使材料产生腐朽、虫蛀等而破坏。

4）机械作用，包括冲击、疲劳载荷、各种气体、液体及固体引起的磨损与磨耗等。

实际工程中，工程材料受到的外界破坏因素往往是两种以上因素同时作用。金属材料常由化学和电化学作用引起腐蚀和破坏；无机非金属材料常由化学作用、溶解、冻融、风蚀、温差、湿差、摩擦等某种因素或综合作用而引起破坏；有机材料常由生物作用、溶解、化学腐蚀、光、热、电等作用而引起破坏。

（2）内部因素　也是造成材料耐久性下降的根本原因。内部因素主要包括材料的组成、结构与性质。当材料的组成易溶于水或其他液体，或易与其他物质发生化学反应时，则材料的耐水性、耐化学腐蚀性较差；无机非金属脆性材料在温度剧变时，易产生开裂，即耐急冷急热性差；晶体材料较同组成的非晶体材料的化学稳定性高；当材料的孔隙率，特别是开口孔隙率较大时，则材料的耐久性往往较差。

下面将金属和非金属的老化（锈蚀）原理分别加以介绍：

材料腐蚀是一种自然现象，有其客观规律。金属是导体，腐蚀时多以金属离子溶解进入电解液的形式发生，因此在多数情况下可以用电化学原理加以解释。

1）金属锈蚀的基本原理：金属锈蚀是指金属与周围介质接触，发生化学作用或电化学作用引起的破坏现象。按照金属锈蚀的机理，锈蚀可分为化学锈蚀与电化学锈蚀两种类型。一般的金属制品主要是电化学锈蚀。

① 金属化学锈蚀：化学锈蚀是指金属在干燥气体或无电解质存在的环境中，受外界介质作用直接发生化学反应而引起的腐蚀。它的特点是腐蚀过程中无电流产生，腐蚀产物直接生成于反应的表面区域。这种腐蚀产物薄膜即氧化膜盖住金属的表面之后，能在一定程度上降低金属与介质的反应速度。如果形成的膜很紧密、很完整，能把金属和介质隔开，阻碍它们互相接触，保护金属不遭受进一步的腐蚀，例如铝和氧化合成 Al_2O_3，薄膜紧密完整，保护性好，形成了一层表面保护膜，降低了金属的腐蚀速度，金属在高温下的氧化和在常温下干燥环境中受气体如 O_2、SO_2、H_2S、HCl 等的作用，都属于化学腐蚀。在高温时，化学腐蚀比较明显，在常温下化学腐蚀就不是主要的了。

② 金属的电化学锈蚀：金属与电解质溶液或潮湿空气作用，发生原电池或微电池作用，有电流产生的腐蚀过程称为电化学腐蚀（锈蚀）。

当两种金属置于电解液中，表面形成不同的双电层，组成了电池的正、负极，其电极电位不同，负电性较强的金属离子从阳极进入溶液，金属阳离子就与电解质溶液中的阴离子结合，阳极金属即被腐蚀。而溶液中的阳离子趋向正电性较强的阴极，与电子结合而放电。类似的这种形式称之为腐蚀原电池。

形成腐蚀原电池应具备三个条件，即：不同金属或金属不同部位存在电位差；具有电位差的金属处于相连通的电解质溶液中；不同电位的两部分金属间要有导体相接。

当一种金属置于电解液或潮湿空气中，并未与其他金属相接触也会发生锈蚀现象。这是因为金属并非绝对纯净，有其他成分或杂质，当有电解液时，就形成了腐蚀电池，称为微电池。它是由金属表面的电化学不均匀性引起的。在潮湿空气中，金属的破坏主要是在极薄的水膜下发生的。这时金属表面电解液膜的形成，主要是水蒸气在金属表面的凝聚，空气中的 SO_2、H_2S、HCl、CO_2、NH_3 等均可溶于水膜中形成电解液，加剧金属锈蚀。

大气腐蚀的特点：空气中氧通过金属表面的水膜，比完全浸于水中容易得多，水膜越薄，氧越易通过它达到阴极，金属越易锈蚀，以铁为例，其腐蚀的反应式为：

$$2Fe + O_2 + 2H_2O = 2Fe(OH)_2$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O = 4Fe(OH)_3$$

生成物氢氧化铁和氢氧化亚铁的混合物即铁锈。

2）影响金属锈蚀的外界因素：金属锈蚀是金属与环境互相作用发生电化学腐蚀的结果。因此，金属本身的特征和环境中的因素两方面共同影响金属的腐蚀过程。由于本书在此讨论的是材料的应用，故不研究金属本身的特征对腐蚀的影响，只讨论大气因素对金属腐蚀的影响。

① 空气的相对湿度和温度的影响：空气的相对湿度对腐蚀的影响较大，当相对湿度较低时，金属腐蚀很慢，随着湿度的增加，腐蚀速度增加得并不快，但当相

对湿度逐渐增加到一定值（称临界相对湿度，简称临界湿度）时，金属的腐蚀速度急剧加快。

温度对金属腐蚀的影响不是孤立的，同时也受到相对湿度的影响，一般当相对湿度低于临界湿度，或低于 65% 时，温度对金属腐蚀的速度影响不大。无论在什么温度下金属腐蚀的速度都很小；但当相对湿度在临界湿度以上时，温度对腐蚀的影响就相当大。在温差变化大的情况下，温度对腐蚀的影响更显著。由于温度大幅度下降，在金属制品表面产生凝露，这将加速金属腐蚀。因此，对于昼夜温差大，室内外温差大或炎热多雨的场合，金属产品最易生锈。

② 氧气对金属腐蚀的影响：氧气和水一样，是金属在大气中腐蚀的必要因素，缺少其中之一，金属就不会被腐蚀。

3）其他因素对金属腐蚀的影响：大气中除氧和水分外，其他因素如海洋盐雾、工业烟尘等均会加速金属的腐蚀。

大气环境中燃烧及工业生产中产生的 SO_2 对金属腐蚀的影响极大，尤其对钢铁腐蚀影响更大。如果铁的表面十分清洁，并且空气也很清洁，其临界相对湿度就接近 100%，但如果空气中含有万分之一的 SO_2，其临界湿度就下降到 70%。SO_2 与铁反应生成硫酸铁，使铁腐蚀，而腐蚀产物生成的水解物硫酸，又能继续腐蚀铁，可见大气中的 SO_2 对金属的腐蚀是相当严重的。

氯化物来自工业大气污染、手汗及海洋盐雾。由于氯离子的体积很小，能穿透金属表面的保护膜，同时取代保护膜中的氧，使钝化的保护膜变为可溶性的氯化膜，加速金属腐蚀。

大气中的尘埃、微粒落在金属表面，由于它们吸湿能力很强，会形成水滴或水膜，且还会进一步吸附其他物质从而加剧金属腐蚀。

一般金属在工业大气、城市大气与海洋大气中腐蚀较快，而在农村大气中腐蚀就较慢。因此，在设计金属制品时，应充分考虑金属产品流通区间的气象条件和环境特点。

4）非金属材料的老化：非金属材料是非导体（个别除外），其腐蚀规律很难用电化学原理来说明。对于非金属材料而言，无论是无机非金属材料，还是有机高分子材料，其腐蚀特征都是环境介质向材料内部扩散渗透，同时非金属材料的某些组分由其内部向外扩散迁移，进而发生材料组分的溶出，有时还生成溶胀性物质，使非金属材料劣化变质。

硅酸盐玻璃在常压下，气体和液体都可通过扩散渗透而浸入玻璃，并通过化学反应破坏硅氧骨架，同时玻璃组分中的某些阳离子也通过迁移扩散而与外界进行交换，进而引起玻璃的化学腐蚀。硅酸盐水泥制品在侵蚀性的酸、强碱、硫酸盐和水作用下，使水泥制品的组分溶出（包括物理和化学的）或生成溶胀性物质，进而使水泥制品结构发生破坏。

塑料常以耐腐蚀性优良而著称，但塑料并不是不腐蚀的。塑料的腐蚀有化学侵

蚀、溶解、渗透和老化四类。化学侵蚀导致聚合物分子键的不可逆断开，如20%硝酸对尼龙66的化学侵蚀；溶解虽属物理作用，不会改变聚合物链状结构的化学组成，但溶解却使塑料性质发生变化，如丙酮溶解有机玻璃；渗透是塑料吸收液体、气体或蒸汽的能力，这种吸收可能是物理或化学的作用，结果引起塑料的溶胀，如聚酰胺类塑料吸水会发生溶胀，影响其电性能等；高聚物的老化是由于环境中各种物理、化学及生物因素的作用，致使聚合物结构发生变化，使性能劣化或失效。导致老化的环境介质有物理因素如阳光、紫外线或其他辐射。化学因素如空气中氧、臭氧、水、酸、碱、盐及有机溶剂等，生物因素（微生物）以及加工成型时的热和机械力作用。老化造成的结构变化之一是相对分子质量下降，称为“降解”，这时聚合物变粘、变软、力学性能大为劣化；之二是分子链发生交联，这时聚合物变硬、变脆、开裂、丧失弹性，其他性能也随之劣化失效。

木材、植物纤维、天然橡胶、亚麻布、纸张以及含纤维素的塑料等有机材料，在潮湿环境介质中常因真菌、昆虫、细菌等作用引起微生物腐蚀。据报道，东南亚地区从电气绝缘材料中分离出670种不同霉菌，其中较多的是黑曲霉、黄曲霉、杂色曲霉、球毛壳菌及青霉菌等。它们在一定温度、湿度和养料下，就可以赖以生存和繁殖，由这些非金属材料制成的设备就会出现故障或受到损坏。此外，某些非金属材料在空气中由于物理和化学的作用而发生风化变质，如硅酸盐水泥在储存中常因风化而结块，降低其水硬性。对于多孔性材料，如水泥制品和木材等，当处在冻融循环和干湿循环的介质条件下，常使材料体积发生变化，性能下降。

2. 材料的腐蚀防治

金属中常用的防治腐蚀的方法主要是通过使用防锈剂，品种主要有以下几种：

（1）防锈水　将一定量的水溶性防锈剂溶解于水中所制得的具有防锈能力的水溶液称防锈水。

长期防锈封存用的防锈水要采用蒸馏水或去离子水做原料。

防锈水对金属的保护原理，大致可分为以下三种情况：

1）防锈剂与金属作用，在表面生成不溶性的、致密的氧化膜，抑制了金属的腐蚀，但在使用这类防锈剂时，要注意防锈剂的用量要足，要使其在金属表面能形成完整的氧化物膜，否则，未被遮盖的部分腐蚀电流密度增大，会引起局部腐蚀加剧。所以这类防锈剂又称危险防锈剂。亚硝酸钠、重铬酸钠等就属于这类防锈剂。

2）金属与防锈剂作用生成难溶性盐类，将金属与腐蚀介质隔开，从而达到保护金属的目的。碱金属的磷酸盐、碱金属的硅酸盐对铁的防护作用就属于此类型。

3）金属与防锈剂生成难溶性络合物，覆盖于金属表面，达到防锈的目的。苯骈三氮唑对铜的保护即属此类型。

用于制造防锈水的无机水溶性防锈剂常用的有亚硝酸钠，用于铁的防锈；铬酸盐及重铬酸盐，用于铜、铝、锌、镁及合金制件的防锈；水溶性磷酸盐如六偏磷酸钠、磷酸钠、磷酸二氢钠等，它们对钢、铸铁和铝有防锈作用，但对铜等却有促进

腐蚀的作用；硅酸钠用于钢、铸铁、锡、锑、铝等金属及其焊接、铆接制件。以上几种无机防锈剂若几种混合使用，可以达到多功能防锈的作用，效果会更好。此外，偏铝酸钠也可以作为铸铁防锈剂，但它在50℃以上使用时，是危险防锈剂。

大多数无机防锈剂只有在碱性介质中才能保护金属，在酸性介质中将成为腐蚀促进剂。所以，应在水溶液中加入少量碳酸钠，以调节防锈水的 pH 值。

有机水溶性防锈剂有苯甲酸钠和苯甲酸铵，适用于钢、铁和铜的防锈；单乙醇胺和三乙醇胺适用于钢铁防锈；尿素也适用于钢铁的防锈，它们也可互相配合或与无机防锈剂配合使用。此外，苯骈三氮唑可用于铜及铜合金制件的防锈。

（2）防锈油、乳化型防锈液及防锈脂

1）防锈油是在矿物油中加入油溶性防锈剂及其他助剂制得的一种防锈材料。防锈油取材较容易，防锈效果较好，成本也低，是使用最广的一种防锈材料。

防锈油的防锈作用是由防锈剂和基体油两部分共同贡献的。油溶性防锈剂的分子是由两部分组成的，一部分是长链烃基，它能使整个分子溶于油，另一部分是使化合物具有保护性的官能团，如硝基、磺酸基、氨基、羧基、酯基等。油溶性防锈剂的保护性基团在金属表面被吸附，吸附后金属的离子化倾向下降，从而减少了电化学腐蚀。另外，吸附层能使侵蚀介质与金属表面隔离，而基体油在油溶性防锈剂吸附少的区域也进行物理吸附，并进入到油溶性防锈剂中间去与之一起形成完整的吸附膜，使吸附不牢的防锈剂分子不易脱落，基础油还能与防锈剂一起形成缔合物，保障膜具有一定的厚度。

防锈油所使用的油溶性防锈剂主要有石油磺酸盐，如石油磺酸钡、钙类；硬脂酸、环烷酸及它们的皂类；羊毛脂、单油酸季戊四醇酯等酯类以及油酸二环已胺、磺酸胺盐等胺类，它们可单独使用或互相配合使用。

基体油则根据防锈油的用途选择，通常选择矿物油，如机油、变压器油、高速机油、某些型号的汽油等。轻质油属低粘度油，凝固点在 -60℃左右，多用于精密仪器的防锈；中质油最低使用温度为 -200℃，多用于一般仪器及武器的防锈；重质油属高粘度油，用于大型设备的防锈，在常温下使用。

防锈油中还可加入粘度调节剂来使基体油具有适当的粘度。加入降凝剂，用来降低油的凝固点，使其适应于产品所处的环境。

2）将防锈油用水稀释，并加入乳化剂、水、油溶性防锈剂及助剂就可制得乳化型锈液。

乳化型防锈液常用低、中粘度的基础油，所用的乳化剂有各种磺酸盐类，如十二烷基磺酸钠、十四烷基磺酸钠、十六烷基磺酸钠、十二醇磺酸钠等；三乙醇胺；脂肪酸与多羟基醇所生成的醚，如聚氧乙烯辛烷基酚醚、聚氧乙烯壬烷基酚醚等。

乳化液中加入的水油溶性防锈剂有石油磺酸钡、十二烯基丁二酸、环烷酸锌等，它们具有足够长的烃基，使之能溶于矿物油，又因有极性大的基团，而具有良好的亲水性和乳化性。为提高防锈能力，还可加入一些水溶性防锈剂，如亚硝酸

钠，三乙醇胺等。

当用动、植物作乳化剂原料时，高温或长期使用易于生霉，此时可加入防霉剂。为保证生产、储存、使用时的方便，还可加入稳定剂、助溶剂、消泡剂等助剂。

3）若将油溶性防锈剂加入到工业凡士林中，再加以适当抗氧剂、分散剂，用一定的润滑油稀释混合均匀即可制成防锈脂。

（3）溶剂稀释型防锈油　这是一种挥发性溶剂稀释的防锈油或油脂。它施涂方便，可以直接喷涂、刷涂或浸涂。刷涂后，当其中的溶剂挥发后，可在金属表面获得比普通的防锈脂和防锈油都薄的油膜。

根据油膜的材料不同，可将溶剂稀释型防锈油分成软膜型和硬膜型两种，油膜由油、油脂或蜡、蜡状物构成的叫软膜溶剂稀释型防锈油，所用防锈剂为一般油溶性防锈剂，溶剂可用石油溶剂、石脑油、石油醚、二甲苯等。

由沥青、松香、乙基纤维素、酚醛树脂等构成油膜的叫硬膜溶剂稀释型防锈油，所用防锈剂与软膜相同，常用溶剂有石油溶剂、甲苯、二甲苯及混合溶剂。

软膜油的特点是在金属表面易成膜，流失少但不易除去，防锈期较短；硬膜油的成膜保护性好，膜层薄，表面光滑不粘，夏不流冬不裂，施工方便。使用前可用汽油、煤油、二甲苯等除去金属表面的油膜。所以这一类油还有一个施工时污染环境、使用时要除膜的缺点。

另一类溶剂稀释型防锈油是人汗置换型防锈油，它所用的溶剂主要是低粘度的煤油或汽油，这样可以形成较薄的油膜，所使用的防锈剂主要是磺酸盐类，其特点是具有比水强的吸附能力，因而具有水置换性，能置换出已粘附在金属表面的手汗。一般在金属制品封存之前，先用置换型防锈油置换掉金属表面的水、人汗及污物，以防构成腐蚀电池。

（4）气相防锈剂　是具有气化性的液体或固体的金属腐蚀抑制剂的总称，又叫挥发性缓蚀剂。

气相防锈剂具有很高的饱和蒸汽压，在常温下能慢慢挥发，挥发出来的气体对金属表面起保护作用。因此，使用时无须与被保护物直接接触即可起到防锈效果。气相防锈剂挥发出来的气体无孔不入，可到达一般防锈剂不易涂到的缝隙、不通孔、死角等处，且包装起封后不需去掉防锈剂即可使用，故用于异型复杂的零部件及设备尤其合适。气相防锈剂应用时要求包装的密封性要好，否则有效防锈成分会散失，达不到预期的防锈效果。

气相防锈剂应具备下列条件：

1）常温下要有一定的蒸汽压，以保证适当的挥发速度。

2）蒸汽要有一定的扩散速度，能较快地充满包装空间。

3）化学稳定性好，在使用时不分解、不变质；能溶于油、有机溶剂或水，以适应不同包装技法的要求。

气相防锈剂的种类很多，如有机酸、有机胺和无机胺的胺盐等，其中后两类最有效，如尿素、单乙醇胺、苯甲酸胺、二环己胺、六次甲基四胺、环己基苯甲酸胺、亚硝酸二环己胺等，它们对钢有较好的防锈效果。邻硝基酚二环己胺等对铸铁有防锈效果，苯骈三氮唑可用于铜的防锈。

气相防锈剂对金属的保护作用，主要表现在：在金属表面起阳极钝化作用，阻滞阳极的电化学过程；带有较大非极性基的有机阳离子，如亚硝酸二环己胺的阳离子的定向吸附，在金属表面形成疏水性膜，起到了阻隔腐蚀介质、降低金属电化学反应能力的作用；与金属表面结合成稳定的络合物，增加金属表面电阻而保护金属；与水作用后能提高介质的 pH 值，降低腐蚀速率；使包装空间的相对湿度降到临界值以下。

气相防锈剂的主要使用形式有：

1）固体形式，将气相防锈剂直接洒于金属表面后密封包装；将粉末盛于有透气性的布袋或纸袋内，或将粉末压成片剂，置于包装内金属制品周围。一般与金属表面距离不大于 30cm。用量一般每立方米不低于 30g。

2）浸渍或涂覆形式，将气相防锈剂制成水溶液或将其溶于有机溶剂中，然后用此溶液浸渍或涂刷在纸、布表面，干燥后即制得气相防锈纸或布。使用时将涂有防锈剂的一面向内包装金属制品，外层再用石蜡纸、金属箔、塑料袋或复合材料密封包装；若包装空间过大，可添加适量防锈纸片或粉末。

3）制成气相防锈塑料薄膜，可以在气相缓蚀剂溶液中加入塑料用粘合剂，然后将其涂覆在塑料薄膜上，或将气相防锈剂与树脂一起成型制成气相防锈薄膜或包装容器。它们的特点是透明、美观、使用方便，可热焊封，有长期稳定的防锈效果。

无论何种气相防锈方法，都必须配以密封性较高的外包装材料。包装时包装内相对湿度要低，必要时可辅以干燥剂，并防止光、热作用或与酸、碱接触，以免防锈剂分解失效。

（5）可剥离防锈涂料　又叫临时封存涂料。使用时将这种涂料涂到金属制品的表面，形成一层完整的透明薄膜。这种膜使金属表面与外界隔绝，并起到防腐蚀作用，还能防止金属表面受到机械损伤。塑料薄膜不直接粘附金属表面，而被析出的一层油膜隔开，待完成防护作用后，可将这层薄膜剥掉，不影响金属产品的使用。

可剥离防锈涂料与上述几种防锈材料比，具有涂膜柔韧性好，机械强度高。耐磨性好、防锈期长、耐候性好、使用方便等优点。

可剥离防锈涂料是以高分子树脂为成膜材料，并配以矿物油、防锈剂、增塑剂、稳定剂等。常用的成膜树脂有过氯乙烯、乙基纤维素、醋酸丁酸纤维素、聚苯乙烯等。

（6）非金属材料的腐蚀防治　从广义上讲，非金属材料如陶瓷、玻璃、塑料

等都具有较好的化学稳定性。某些陶瓷、塑料甚至比贵金属或不锈钢的耐蚀性还好。但是由于环境介质的多样性和非金属材料组成结构与构造的复杂性，致使非金属材料不可能在任何环境介质下都能具有耐腐蚀的性能。目前，对非金属材料腐蚀的研究无论在深度和广度上远不及金属。为提高非金属材料在环境介质下的稳定性，今后应加强非金属材料的腐蚀研究。

鉴于非金属材料腐蚀的防治方法很多，大多数的腐蚀防治是从内因和外因两个方面着手。如硅酸盐玻璃在组分上降低碱金属氧化物的含量，则可提高玻璃的化学稳定性；硅酸盐水泥在矿物组成上降低铝酸三钙的含量，就可改善水泥的抗硫酸盐侵蚀性能，木材在使用和储存中，使其处于干燥（或饱水）状态下，可以有效防止菌类对木材的腐蚀和昆虫的蛀蚀。木材防腐还可采用化学防腐剂（如五氯酚钠、CCA 防腐剂等）；有机高分子材料在组成上通过添加稳定剂等手段可以提高聚合物在环境介质条件下的稳定性。了解材料劣化变质的内外原因及其变化规律，对提高材料的使用价值，保证工程的耐久性都具有一定的意义。

第 2 章　塑料和橡胶

2.1　概述

长期以来，工程材料一直是以金属、木材及其他无机材料为主，以金属材料为例，多以黑色金属为主。虽然金属材料具有许多优良的性能，如强度高、热稳定性好、导电、导热性好等优点；但也存在许多缺点，有些要求如密度小、耐腐蚀、电绝缘等，金属材料是不能满足的。由于合成材料和近代工业陶瓷的出现，使工程材料领域大为扩大，再也不是金属材料一家独揽了。目前广泛使用的非金属材料主要有高分子合成材料中的塑料、合成橡胶、合成胶粘剂、陶瓷和复合材料，其中以塑料的应用最广。

2.2　高分子合成材料

高分子合成材料也称高分子化合物、高分子或高聚物，它们在国民经济各部门，军事工业和尖端科学技术方面得到了广泛的应用，显示了重要的作用。

高分子合成材料具有高强度、高绝缘、高弹性、耐水、耐油、耐磨、耐腐蚀和质轻等一系列优异性能。例如，定向的聚丙烯拉成丝以后，其强度与钢不相上下，而它的相对密度却只有钢的 1/8；尼龙纤维的耐磨性比棉花约大 10 倍。另有一些高分子合成材料用于特殊的耐高温、耐辐射、耐腐蚀等方面更有独到之处。

2.2.1　高分子化合物概述

1. 高分子化合物的含义

根据有机化合物相对分子质量的大小，可将有机化合物分为低分子有机化合物和高分子有机化合物两类。低分子有机化合物相对分子质量不超过 500，而相对分子质量大于 500 的称为高分子有机化合物，它一般在 10^3 ~ 10^7 的范围内。相对分子质量大是高分子化合物最基本的特性。表 2-1 中列出了两种有机化合物相对分子质量比较。

高分子物质相对分子质量虽大，但是组成高分子物质的每个大分子都是由一种或几种简单的低分子物质重复连接而成的，使大分子成为链状结构。例如：聚氯乙烯是由氯乙烯加成聚合而成的。这样，高分子化合物聚氯乙烯是由氯乙烯单体多次重复组成的。组成高分子化合物单体结构的单位叫做链节，一个高分子化合物中的

链节数目叫做聚合度 n。

表 2-1　高分子有机化合物和低分子有机化合物的相对分子质量比较

低分子有机化合物		高分子有机化合物			
		天然高分子有机化合物		合成高分子有机化合物	
物质	相对分子质量	物质	相对分子质量	物质	相对分子质量
甲烷	16	淀粉	约 100 万	聚苯乙烯	5 万以上
乙烯	28	蛋白质	约 15 万	聚异丁烯	1 万 ~ 10 万
苯	78	纤维素	约 20 万	聚甲基丙烯酸甲酯	5 万 ~ 14 万
甘油	92	果胶	约 27 万	聚氯乙烯	2 万 ~ 16 万
蔗糖	342	乳酪	2. 5 万 ~ 37. 5 万	聚丙烯腈	6 万 ~ 50 万

高分子化合物的相对分子质量 = 链节相对分子质量 × 聚合度。

经过聚合而成的高分子化合物，每个分子链的聚合度是不同的，因此实际上高分子化合物是相对分子质量大小不同的同系混合物。对高分子化合物来说，其相对分子质量是指平均相对分子质量。

2. 高分子化合物的分类和命名

合成有机高分子化合物的品种和数量现在已经大大超过了天然有机高分子化合物和无机高分子化合物，而且随着合成工业的发展和新的聚合反应方法的出现，其品种和数量还将继续增长。高分子化学作为一门新兴学科，正迅速发展。对于高分子化合物，有不少不同角度的分类方法，但至今尚未得到一个公认的最合理的分类原则。现就经常使用的几种分类方法介绍如下：

1）按化学组成可分为碳链、杂链和元素有机高分子三类。它表示出大分子链组成的特点。

2）按大分链的几何形状分为线型和体型两大类。

① 线型是各链节连接成一长链（也可带支链）。

② 体型是线型大分子间相互交联，形成网状结构的高聚物。

3）按高聚物的热行为及成型工艺特点分为热塑性和热固性两大类。

加热软化或熔融而冷却固化的过程可反复进行的高聚物称为热塑性高聚物，它们是线型结构。

加热加压成型后不能再熔融或改变形状的高聚物称为热固性高聚物，它们是网状结构。

从材料的使用角度考虑，这种分类便于认识高聚物的特性。

高分子材料的命名方法比较繁杂。有些以专用名称命名，例如蛋白、淀粉等；有些在单体名称前加“聚”字，例如聚氯乙烯等；有的在单体名称后加“树脂”或“橡胶”二字，例如酚醛树脂、丁苯橡胶等；一些结构复杂的高聚物常称呼其商品名称或俗名，如有机玻璃（聚甲基丙烯酸甲酯）；还有以英文字母表示的如

ABS 等。

如同大多数科学领域的情况一样，与反应及特殊化学和物理试验等有关的名称是历史上沿用下来的，并没有全面的指导原则。加上高分子材料科学的内容广泛、庞杂，造成高分子材料命名五花八门。

虽然在实际高分子材料命名中存在各种各样的方法，但最后集中于最广泛使用的三种命名系统上。表 2-2 给出了一些普通高分子材料的名称，用来说明这三种命名系统。只有 IUPAC（国际理论和应用化学联合会）命名法是正规的命名系统，它符合有机化学命名的规则。这一系统使人们既能命名简单的高分子材料，又可命名复杂的高分子材料。第二个系统称之为工业命名法，因为许多工业协会在他们的出版物中使用这种命名系统。第三个系统称之为习惯命名法，因为这一系统是历史上沿用下来的。后两个系统是非正规的，只适用于比较普通的简单的高分子材料，它们之间的主要差别仅仅在于有没有括号。

表 2-2　高分子材料不同命名法的比较

习惯命名系统	工业命名系统	IUPAC 命名系统
聚丙烯腈	聚丙烯腈	聚（1－腈基亚乙基）
聚（氧化乙烯）	聚氧化乙烯	聚（氧亚乙基）
聚（对苯二甲酸乙二酯）	聚对苯二甲酸乙二酯	聚（氧亚乙基对苯二酰）
聚异丁烯	聚异丁烯	聚（1，1－二甲基亚乙基）
聚（甲基丙烯酸甲酯）	聚甲基丙烯酸甲酯	聚（（1－甲氧基酰基）－1－甲基亚乙基）
聚丙烯	聚丙烯	聚亚丙基
聚苯乙烯	聚苯乙烯	聚（1－苯基亚乙基）
聚（四氟乙烯）	聚四氟乙烯	聚（二氟亚甲基）
聚（醋酸乙烯酯）	聚醋酸乙烯酯	聚（1－乙酰氧基亚乙基）
聚（乙烯醇）	聚乙烯醇	聚（1－羟基亚乙基）
聚（氯乙烯）	聚氯乙烯	聚（1－氯亚乙基）
聚（乙烯醇缩丁醛）	聚乙烯醇缩丁醛	聚（（2－丙基－1，3－二氧杂环，己烷－4，6 二氧基）－亚甲基）

2.2.2　高分子化合物的基本反应

高分子化合物的基本反应有两大类，即加聚反应和缩聚反应。

1. 加聚反应

由许多相同或不同的不饱和低分子化合物相互加成或由环状化合物开环相互连接形成大分子的反应叫做加聚反应（又叫加成聚合反应或聚合反应）。在加聚反应过程中，没有低分子产物析出，而且生成的聚合物和原料具有相同的化学组成，其相对分子质量为低分子化合物相对分子质量的整数倍，例如聚丙烯的生成。

最常见加聚反应的单体是烯类化合物。按参加反应单体的种类及高分子化合物本身的构型，加聚反应可分为均聚合、共聚合和定向聚合三种。

（1）均聚合　只有一种物质（单体）进行的聚合反应，叫做均聚合。其产物为均聚物，例如聚乙烯、聚丙烯，聚氯乙烯等都是均聚物。

（2）共聚合　由两种或两种以上的物质（单体）进行的聚合反应，叫做共聚合。例如 ABS。

（3）定向聚合　它是指烯类单体上的取代基在高分子链上的立体排列。众所周知，在饱和的碳氢化合物分子中，碳原子的四个价键互成 109′28″的角度，分布在碳原子的四周，所以碳原子是四面边的立体构型。对高分子化合物来说，通常含不同的取代基。根据取代基所处位置的不同，高分子又有不同的立体构型。如乙烯类高分子链常有以下三种构型（图 2-1）：

1）全同立构（图 2-1a）：取代基 R 全部处于主链的一侧。

2）间同立构（图 2-1b）：取代基 R 相间地分布在主链的两侧。

3）无规立构（图 2-1c）：取代基 R 在主链两侧作不规则的分布。

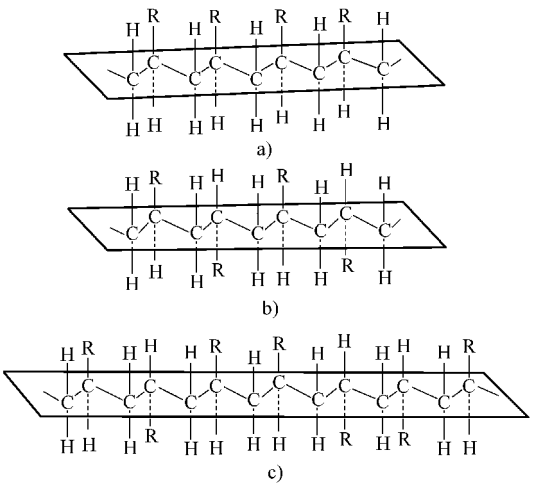


图 2-1　乙烯类高分子链的三种构型

立体构型的不同对高分子化合物的物理性能、力学性能影响很大。例如，无规立构的 PS 由于结构规整性差而不能结晶，耐热性较差，80℃即开始软化，但是它的透明性好，易于加工，应用比较广泛。全同立构的 PS，结构规整，结晶度高，熔点高，综合性能较好，目前正在推广使用。

2. 缩聚反应

具有双官能团的低分子化合物相互作用，生成高聚物，同时析出某些小分子化合物（水、氨、醇等）的反应叫缩聚反应。其产物叫缩聚物，如聚酰胺（尼龙）、酚醛树脂（电木）、环氧树脂等分子材料，都是缩聚物。同样，缩聚反应也可以分

为均缩聚和共缩聚两种。

2.2.3　高分子化合物的物理状态

从结构的观点来看，高分子化合物有晶态与非晶态两种。链结构规整的，能结晶的高分子化合物称为结晶性高分子化合物；链结构不规整的，一般不能形成晶粒的高分子化合物称为非结晶性高分子化合物（或称无定形高分子化合物）。

1. 非晶态高分子化合物的物理状态

非晶态高分子化合物在不同温度下，存在三种物理状态：玻璃态、高弹态和粘流态。各状态的特征，主要从形变能力（一般是指一定负荷下伸长率或压缩率）表现出高分子化合物能从一种形变状态随温度的改变而过渡到另一种形变状态。表示这种特征的曲线称为温度－形变曲线（热－机械曲线）。

在恒定应力下线型无定形高聚物的温度－形变曲线如图 2-2 所示。

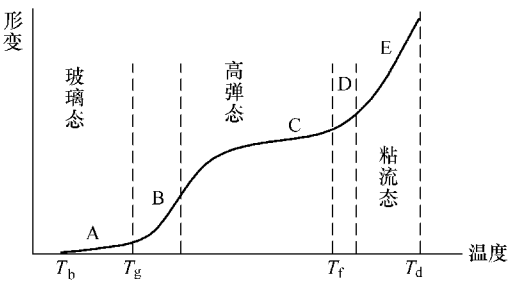


图 2-2　线型无定形高聚物在恒定应力下的温度－形变曲线

A—玻璃态　B—过渡区　C—高弹态　D—过渡区　E—粘流态

T_b—脆化温度　T_g—玻璃化温度　T_f—粘流温度，T_d—分解温度

具有柔顺性的高分子之所以具有不同的聚集状态，主要是因为其高分子链具有两种运动单元，一种是大分子链整体的移动，另外一种是链段运动。因为大分子与大分子之间具有一定的范德华引力，所以不易活动。这就使高分子化合物具有固体特性，并有很高的粘度，甚至在较高温度下也不易流动；另一方面，由于链的内旋转，导致链段的运动，使高分子化合物具有高的弹性及柔顺性。

在低温时，加外力作用后形变很小。这时，无论是整个分子链的移动或是链段的内旋转运动都已冻结，分子的状态和分子的相对位置都被固定下来，但分子的排列仍然是极不规整的。此时，分子只能在它自己的位置上作振动，高分子化合物变得很坚硬，这种状态叫做玻璃态。当加以外力时，链段只作瞬时的形变，相当于链段微小的伸缩和链角的改变等。外力除去后，立即回复原状，这种形变是可逆的，故称为瞬时弹性形变（也叫普弹形变）。

温度上升，高分子化合物的粘度增加。当温度上升超过玻璃化温度 T_g 后，高分子化合物开始变得柔软，而且呈弹性。这时，加上外力即可产生缓慢的形变，除

去外力后又会缓慢地回复原状，这种状态叫做高弹态。在高弹态时，分子之间不会发生相对滑动，但是链段可以内旋转，有可能把链的一部分卷曲或伸展，得到柔软和富有弹性的橡胶类物质。这种形变叫做高弹形变。

一切高弹体产生高弹性能的根本原因是具有柔顺的长链分子，因此只有高分子化合物才可能是高弹体。低分子化合物的玻璃化温度 T_g 和流动温度 T_f 重合，即由玻璃态直接过渡到流动态，不经过高弹态。

高弹态有两个主要的特征：一是有很大的弹性形变，例如橡胶一类的高弹形变物质，形变可达其原来体积的 1000%；二是有显著的松弛现象，即它的弹性形变是随时间而逐渐发展的。

当温度继续升高，到达流动温度 T_f 后，高分子化合物变成极粘的液体，这种状态称为粘流态。此时，大分子之间可相对滑动，高分子链和链段都可以移动。当受外力时，分子间互相滑动而产生形变；除去外力后，不回复原状。这种形变是不可逆的，故称为粘性流动形变（或塑性形变）。

具有柔顺性高分子化合物的粘性流动有三个特点：第一是链段的移动。它对粘度的影响很小，且与高分子化合物的相对分子质量无关；第二是整个分子的移动。它对粘度的影响很大，并且与相对分子质量有很大关系。例如：低分子化合物液体的粘度一般为 0.001 ~ 0.01Pa · s，而高分子化合物液体的粘度一般为 1 ~ 100Pa · s；第三是在流动时分子链的构象有改变。柔顺性高分子链原来的自由状态是卷曲的，在流动时相当于施加一外作用力使高分子拉伸，增加分子间的接触面和分子间的摩擦力，因此流动过程中粘性逐渐增加，直到松弛现象完成为止。这样，高分子的流动不会是单纯的粘性流动，也要伴随着高弹形变。高分子化合物流动温度的大小与其相对分子质量有密切关系，如果相对分子质量高，其流动温度也高。这是因为高分子化合物之间的作用力正比于链长，这就是链短的分子易滑动的缘故。

在室温下，对于每一高分子化合物来讲，总是处于这三种状态之中。处于粘流态的称流动性树脂，例如液体环氧树脂；处于高弹态的称为橡胶，例如天然胶、丁苯胶；处于玻璃态的为塑料，例如聚苯乙烯等。

虽然处在玻璃态下的高聚物很硬，但由于分子之间的作用力，高分子化合物仍具有一定的机械强度。当温度更低，达到脆性温度 T_b 时，在外力作用下，大分子链则断裂，这个温度称为脆化点。它是高分子性能的终止点，在此温度以下，高分子化合物处于脆态，大分子链的柔顺性消失。因此，T_b 是塑料使用温度的下限，T_g 则是上限。然而在室温下，对经常处于高弹态的橡胶来说，T_g 却是它的使用温度下限。所以在实际应用中，作为橡胶使用的高分子化合物，它们的玻璃化温度越低越好，即温度很低仍不失去其弹性；但对作为塑料及纤维来使用的高分子化合物，则玻璃化温度越高越好，这样在较高的温度下，不致因稍微增加负荷即发生巨大形变。尤其是在制备耐高温的高分子化合物时，就是希望提高它的玻璃化温度。

温度－形变曲线是一种研究高分子化合物结构与物理性能的常用方法。通过温度－形变曲线的分析，可以看出这种高分子化合物在什么温度下可能存在哪些状态。由此可以作出判断，这种高分子化合物在哪些温度和条件下可以应用，并可确定成型加工的工艺条件。

高分子化合物的流动性能对于加工工艺具有很重要的意义。要得到很好的塑料制品，就必须严格控制预热及模塑的时间和温度，以便产品有足够的时间达到完全粘性流动，使高弹形变达到完全松弛。否则，高弹形变冻结在玻璃态内，形成内部应力，制品冷却后就会裂开。又如在模塑时，必须很好地控制温度与压力，使高分子化合物粘度维持一定限度。否则，如果粘度太大，流动的高分子化合物就不能在注模时间内注满；如果要在一定时间内注满，就必须要加大压力，这样工艺要求就复杂了。而且流动性太大，高分子化合物又会从模具缝隙溢流而出，严重影响产品的质量。所以在加工前，必须很好地了解所加的外力及高分子的相对分子质量与温度等对粘性流动的影响。在作为涂料、胶粘剂使用时，都应该对高分子化合物的粘性流动特性有较好的了解。

2. 结晶高分子化合物的物理状态

随着近代合成方法的发展，结晶性高分子化合物的品种和数量也越来越多，并越来越显示出其重要性。例如聚乙烯、聚酰胺（尼龙）等。

非晶态高分子化合物的性能可用脆化温度 T_b、玻璃化温度 T_g、粘流温度 T_f 和分解温度 T_d 来表示，因此它们的应用将被限制在一定的温度范围内。同时，如果要改善它们的性能，就必须扩大其应用的温度范围。而结晶高分子化合物在玻璃化温度以上和熔点以下时，仍不转变为高弹态，因此结晶高分子化合物作为塑料时可以扩大使用温度范围。同时，结晶高分子化合物由于分子之间的作用力较大，反映在材料上就具有很高的强度，这有利于我们把高分子化合物制成纤维。

当结晶高分子化合物加热到熔点以上时，可以出现高弹态，也可以直接到粘流态，这主要决定于结晶高分子化合物相对分子质量的大小。相对分子质量大者，就有高弹态。结晶高分子化合物在熔融后有高弹态时，对加工是不方便的。由于相对分子质量大时其强度也大，故当高分子化合物的强度已满足使用要求时，为了便于加工，总是选用相对分子质量小一些的材料。这样，在熔融后就成为流动态，这是结晶高分子化合物与非结晶高分子化合物的不同之处。如果熔化后有高弹态出现，即在温度—形变曲线上有水平部分，那么要再升高温度到流动点以上才变成粘流态。高聚物的熔点一般是不随相对分子质量变化的。因此，要区别试样是结晶性或是非结晶性时，需要用两种不同相对分子质量的试样来进行温度—形变曲线的测定。结晶高分子化合物的熔点不依赖于相对分子质量的变化，而非晶态高分子化合物的流动温度则随相对分子质量的增大而升高。在非晶态高分子化合物的脆化点时，结晶高分子化合物也变脆，而且一般脆化温度还较高些。本来柔性链分子是有利于结晶的，但结晶了的高分子化合物的分子，由于晶格排列的限制，使其活动性大

大降低。如果分子间有位移，就要破坏其结构，因此，脆化点必接近于非晶态高分子化合物的玻璃化温度。作为塑料使用时，结晶高分子化合物的使用温度范围在脆化点与熔点之间，而非结晶高分子化合物的使用温度范围是脆化点与玻璃化温度之间。

2.2.4　高分子化合物的老化与防老化

合成高分子化合物在长期使用过程中，由于在空气中受到氧、光、热以及微生物等的作用，会使其物理化学性质随时间的增长而逐渐变坏，即“老化”。老化主要表现在材料的硬度及脆性提高了，强度降低了，也就是高分子化合物失去原有的弹性及挠曲性，与此同时，制件最初的尺寸也发生了变化。在实际生活中，高分子化合物的老化现象到处都可以遇见。例如：橡胶雨鞋的发粘，塑料雨衣的开裂变脆，涂料的龟裂脱落等。

引起高分子化合物老化的内在原因是高分子化合物大分子链的交联与裂解。

高分子化合物老化过程的最初阶段是生成游离基。游离基的生成，是由于高分子化合物与氧生成过氧化物的分解而产生的，也可能是由于光或热的作用引起的。光和热能够使聚合物加速氧化。任何一种方法生成的游离基，都能引起链发生交联，或者是导致链的裂解。

总之，高分子化合物的老化是一个比较综合性的复杂问题，它涉及高分子化合物本身的结构和工作条件，至今有许多问题尚未完全弄清楚，有待于进一步研究。目前，采取的防老化措施大致有以下三个方面：

（1）高分子化合物结构的改变　例如：将聚氯乙烯氯化，可以改善其热稳定性；将 ABS 树脂改为 A（丙烯腈）、C（氯化聚乙烯）、S（苯乙烯）共聚，则可提高其抗光老化性。

（2）添加助剂　针对各种高分子化合物产生老化的机理，添加防老剂、紫外光吸收剂等。由于在光、热、氧等因素作用下，都能使高分子产生游离基，而游离基的链式反应将会引起高分子化合物结构与性能的改变。因此，要防止老化就必须抑制游离基的链式反应。凡是能起终止游离基链式反应的阻聚剂，都可以作为防老剂，如芳香族仲胺类化合物等。

（3）表面处理　可在高分子化合物表面喷涂金属或涂料保护层，使其与空气、水分、阳光等隔绝，以防止老化。

只有掌握了高分子的性质和结构的关系后，才有可能根据实际要求去制造新的、合乎需要的高分子化合物，同时也能更好地使用已知的高分子化合物，防止老化的产生。

2.3　塑料

塑料是指由高分子化合物为基础组成的，并且具有可塑性质的材料。

2.3.1　塑料的组成、分类

1. 塑料的组成

（1）树脂　塑料的最基本成分是高分子化合物，也称为树脂。塑料中的其他组分都靠树脂粘合起来。树脂不仅决定了塑料的类型（热塑性或热固性），而且影响塑料的主要性质。树脂在塑料中的含量一般是10%～100%。

（2）填料　塑料中另一重要但并不是必需的成分是填料。根据化学组成的不同，可分为无机填料（碳酸钙、石棉、云母、玻璃纤维等）和有机填料（木粉、纸张、棉织物等）。

填料的应用不仅可以降低塑料的成本（填料的用量一般在20%～50%），而且可以改善塑料的性能，如石棉可以提高塑料的耐热性，玻璃纤维可以提高塑料的机械强度等。

有的树脂可以不加填料而直接塑制成形。

（3）增塑剂　在塑料中的作用是增加塑料的可塑性。一方面使塑料在成型时流动性增大，另一方面可使制成制品的柔韧性和弹性增加。

选用增塑剂一般要求无色、无毒、挥发性低、能和树脂混溶。常用的增塑剂多半是各种低熔点的固体和高沸点的粘稠液体，如苯二甲酸酯类、癸二酸酯类、磷酸酯类等。

（4）其他添加剂　除了树脂、填料、增塑剂外，塑料中还常加入一些辅助材料，如着色剂、交联剂、稳定剂等。着色剂能使塑料制品具有各种美丽的色彩。交联剂能使高聚物分子间产生交联，由线型结构转变为体型结构。稳定剂也称为防老剂，其主要作用是防止塑料在光、热和大气条件下过早老化，延长使用寿命。一种稳定剂不是对所有老化条件都有较好的稳定作用，常常是仅对某种外界因素具有一种特殊的保护功能，如紫外线吸收剂就具有专门吸收紫外线的本领。

以上各种组分的加入与否，均须视塑料制品的用途和性能不同而定。

2. 塑料的分类

塑料的分类方法目前尚不统一，最通用的方法是按其热特性来区分，可分成热塑性和热固性两大类。

热塑性塑料的特点是遇热软化或熔化冷却后又坚硬，这一过程可以反复，如聚氯乙烯、尼龙、聚碳酸酯、聚甲醛等。

热固性塑料的特点是在一定温度下，经过一定时间的加热或加入固化剂后即可固化。固化后的塑料，质地坚硬而不溶于溶剂中，也不能用加热的方法使之再软化，如果温度过高就行分解，如酚醛、环氧、氨基等。

2.3.2　塑料的性能

塑料相对于金属来说，具有重量轻、比强度高、化学稳定性好、电绝缘性好、

耐磨、减摩和自润滑性好等优点。另外，如透光性、绝热性等也是一般金属所不及的。但是作为塑料本身，各种塑料之间也还存在性能上的差异。造成这种差异的原因是多方面的，本节仅就塑料在力学性能、热性能、电性能、化学性能等方面做一些简单的介绍，作为设计塑料制品和选用塑料时的依据。

1. 力学性能

（1）强度　与金属相比，塑料的强度和弹性模量较低，例如热塑性塑料的强度一般为 50 ~ 100MPa，热固性塑料一般为 30 ~ 60MPa，就是增强塑料如玻璃纤维增强尼龙，其强度也只有 200MPa。塑料的弹性模量一般只有金属的 1/10，因此，对于一些承受载荷较大的结构件，塑料是无能为力的。但由于塑料的密度小，其比强度和比模量并不比金属低，它是当前比强度、比模量较高的一种材料。

塑料承受冲击载荷的能力同金属一样，用冲击韧性（或称冲击强度）来衡量。

影响塑料制品强度的因素有以下三个方面：

1）大分子本身结构的影响：大分子链的主价力、分子间力和大分子的柔顺性、聚合度以及结晶度等，都直接影响高聚物的性能。在某种情况下，可能其中一种因素起决定性作用。如主价键力大、强度高，主链上含有芳杂环的高聚物比脂肪族主链的强度高、弹性模量大。相对分子质量大、分子链越长、分子间力越大，拉伸强度和冲击强度增加。结晶度增加、大分子排列规整、分子间力增大，强度增高。

此外，增加大分子的极性基团或产生氢键均可使塑料强度提高。大分子的交联能使分子链不易滑动，增加强度。分子链支化程度的增加、分子间的距离增大、分子间作用力减弱，其拉伸强度降低，但冲击强度增加。

2）添加剂的影响：塑料制品中增塑剂的加入对高聚物起稀释作用，减弱了分子间力，因而降低了塑料制品的强度。但它却使链段运动能力增强，因而冲击强度增加。加入增强剂对塑料制品性能影响也很大。如加入玻璃纤维和碳纤维，塑料强度可以成倍地增加。

3）加工成型的影响：加工成型过程中，在制品内部如果形成裂纹、夹杂物、气孔等，造成应力集中，就会降低塑料的强度和冲击韧性。

（2）摩擦、磨损性能　塑料的硬度比金属低，但是塑料的耐摩擦、磨损性能却远远优于金属。塑料的摩擦因数比较低，同时有许多塑料，如聚四氟乙烯、尼龙等本身就具有自润滑性能。因此，它是制造轴承、凸轮、密封圈等一类摩擦、磨损零件的好材料，并且能在不允许用油润滑的干摩擦条件下使用。

（3）蠕变　指材料受到一固定载荷时，除了开始的瞬时变形外，随着时间的增加而变形逐渐增大的现象。对于金属材料来说，在较高温度时才有蠕变现象。而塑料则不然，在室温下受载荷后就会出现蠕变现象，载荷大时甚至发生蠕变断裂（塑料的这种现象又称为冷流）。因此，长期在载荷下工作的塑料，就需要了解它的蠕变性能，作为设计与选用的依据。

塑料蠕变的机理是高聚物在外力长时间作用下逐渐发生了位移。受力后分子伸长，其中分子由卷曲逐渐改变而伸直，有的分子也可能发生位移，导致不可逆的塑性变形。

影响蠕变的因素有聚合物的结构、环境温度以及作用力大小等。分子链的柔顺性对蠕变影响较大。玻璃化温度可作为一种大致衡量的依据，一般玻璃化温度高则耐蠕变性较好。分子链主链含有芳杂环时耐蠕变性较好。

2. 热性能

塑料的热性能主要有耐热性、导热性、热膨胀性及燃烧性等。

（1）耐热性　塑料的耐热性是用来确定它最高允许使用的温度范围。塑料的耐热性常用马丁耐热温度或热变形温度来表示。

马丁耐热温度是将长条形标准试样（120mm×15mm×10mm）按水平方向夹住一端，另一端加以静弯曲力矩，在弯曲应力为 5MPa 作用下慢慢升温。当样品末端弯曲到规定的变形值时的温度，即为塑料的马丁耐热温度，以摄氏温度（℃）表示。

热变形温度是另一种测定塑料耐热性的方法。试样（127mm × 12.7mm × 3.2mm）横支在双支座上，在中心受载荷（1.86MPa ± 0.05MPa，或 0.46MPa ± 0.01MPa）时下降 2.54mm 时的温度为热变形温度。

常用热塑性塑料的马丁耐热温度一般都在 100℃以下，只有少数几种塑料（如聚碳酸酯、聚砜）在 100℃以上。玻璃纤维增强的热塑性塑料，马丁耐热温度能显著提高（100℃以上）。热固性塑料一般具有较高的马丁耐热温度，如酚醛塑料可达 110℃以上。

（2）导热性　塑料的导热性能是用导热系数来表示。单位面积和单位厚度的物体，它的两个平行面的温度如果相差 1℃，在单位时间内所传递的热量，称为该物体的导热系数。单位为 kJ/（m·h·℃）。

塑料的导热性不好，导热系数一般为 0.84 ~ 2.51kJ/（m·h·℃）。塑料的导热性与金属相比，相差很大，钢为 189kJ/（m·h·℃），铸铁为 42 ~ 168kJ/（m·h·℃），铜为 1386kJ/（m·h·℃）。

（3）膨胀系数　塑料受热后要膨胀，膨胀多少是以膨胀系数来表示。样品温度升高 1℃所增加的长度与它原来长度之比，叫做线胀系数。

塑料的膨胀系数是比较大的，比金属要大 3 ~ 10 倍。因此，在制造带有金属嵌件的，或者与金属件紧紧结合在一起的塑料制品时，常常会因为膨胀系数相差过大而造成开裂、脱落或松动等。

（4）耐燃烧性　在空气中，不同品种的塑料，燃烧时会出现不同的燃烧现象。利用这些燃烧特性可以简易地鉴别塑料品种。

3. 化学性能

一般塑料都有较好的化学稳定性，对酸碱等化学物质具有良好的抗腐蚀性能。

这是因为高分子化合物的分子链很长，而且是缠结在一起的，许多分子链上的基团包在里面，即使接触到能与分子中的某一基团起反应的试剂，只有露在外面的基团才比较容易与试剂起反应。

另外，塑料中的大分子链上含有碳－碳键、碳－氢键、碳－氧键，这些都是牢固的共价键，而且分子链上能发生反应的官能团较少，因此塑料不容易和别的物质发生化学反应，具有较好的化学稳定性。

塑料的耐化学性（或称化学稳定性）是指塑料受化学介质腐蚀的程度和快慢。这除了与介质种类有关外，还与介质的温度、压力，制品内残存的内应力、孔隙多少等因素有关。这就使评定塑料是否耐某种化学介质带来了复杂性。因此，目前尚无统一的评定标准。

2.3.3　常用塑料简介

1. 聚烯烃塑料

（1）聚乙烯（PE）　简称 PE，分子结构式为：

$$+CH-CH_2+_n$$

聚合时如果压力很高，达到 1500～3000MPa，180～200℃温度下，所得到的聚乙烯称高压聚乙烯；高压聚乙烯中含有较多的链分枝，于是有较低的密度、相对分子质量、结晶度，因此质地柔软，适宜制薄膜，也称低密度聚乙烯。低压法是在 1.9MPa 及 100℃左右的温度下，用齐格勒－纳塔催化剂将乙烯聚合得到低压聚乙烯，低压聚乙烯分子中的短链分枝较少，于是就有较高的相对分子质量、密度、结晶度，也称高密度聚乙烯。这种聚乙烯质地坚硬，使它有可能在应用中作为结构材料使用。

线型低密度聚乙烯（LLDPE）是在结构上介于高密度聚乙烯和低密度聚乙烯之间的一种聚乙烯。线性聚乙烯是由长链构成，没有支链。由于线性聚乙烯分子的立构规整性，不会因为支链影响其结晶度，低密度聚乙烯支链多且较长。而线型低密度聚乙烯介于二者之间。在相同相对分子质量时，线型低密度聚乙烯比低密度聚乙烯有更长的主链，更好的规整性，也表现出更优越的性能。所以，实际上，线性低密度聚乙烯有更高的结晶度，可以达到 70%～90%。高密度聚乙烯密度范围为 0.95～0.97g/cm^3。因此，线型低密度聚乙烯一般具有高结晶度和低密度。而非线型一般是低结晶度，且密度范围在 0.89～0.94g/cm^3 之间。与低密度聚乙烯和高密度聚乙烯相比，线型低密度聚乙烯有最好的热封性。表 2-3 为聚乙烯的基本性能。

表 2-3　聚乙烯的基本性能

性　　能	LDPE	HDPE	LLDPE
相对密度	0.91～0.94	0.94～0.97	0.92
结晶度（%）	75	85	

（续）

性　　能	LDPE	HDPE	LLDPE
拉伸强度/MPa	7 ~ 16. 1	30	
冲击强度（缺口）/（kJ/m^2）	48	65. 5	14. 5
断裂伸长率（%）	90 ~ 800	600	950
邵氏硬度 D	41 ~ 46	60 ~ 70	55 ~ 57
连续耐热温度/℃	80 ~ 100	120	105
脆化温度/℃	－80 ~ －55	－65	－76

从聚乙烯分子的结构式看出，聚乙烯分子中只有碳氢两种元素，没有极性基团存在，结晶度高，有些品种使用温度可达120℃，耐寒性能良好。在常温下对各种酸、碱不起作用，在有机溶剂中不溶解，仅发生软化溶胀。另外，聚乙烯属于非极性分子，吸水性小。因此，它的耐蚀性和电绝缘性能极好，适宜制造化工设备中的耐蚀管道、槽、阀件、衬套，以代替铜和不锈钢。由于它的减摩性能很好，可用来制造承受小载荷的齿轮、轴承等。聚乙烯作为水底电缆或一般电缆的包皮，已被广泛应用。可用火焰喷涂法或静电喷涂法涂于金属表面，以提高金属构件的减摩性和耐蚀性。聚乙烯的介电常数小，介质损耗因数也很小，其介电性能不受电场频率的影响，故可用于高频线缆。

低密度聚乙烯还可普遍用于食品、服装包装袋、农用薄膜、日用品包装和收缩缠绕膜等，以及复合薄膜中的热封和粘合层。高密度聚乙烯多用来制造食品包装用瓶、罐、桶等中空容器，也可制成薄膜或复合膜。

（2）聚丙烯（PP）　简称PP，属于热塑性聚烯烃塑料品种之一。由于丙烯原料易得、价格便宜、用途广泛，因此产量剧增。成为产量较大的塑料品种之一。

聚丙烯的结构式如下：

$$\left[\begin{array}{l}\mathrm{CH}-\mathrm{CH_2}\\ \quad|\\ \mathrm{CH_3}\end{array}\right]_n$$

聚丙烯的分子结构，相当于聚乙烯分子每隔一个碳原子连接一个甲基。聚丙烯的密度为0. 90 ~ 0. 91（g/cm^3），是常用塑料中最轻的。

与低密度聚乙烯及高密度聚乙烯相比，聚丙烯的耐热性能良好，在没有外力作用下，加热到150℃也不变形。在常用塑料中聚丙烯是唯一能在水中煮沸，并能经受消毒温度（130℃）的品种。

聚丙烯的力学性能好，拉伸强度、屈服强度、压缩强度、挺度、硬度等都优于聚乙烯，尤其是具有较好的刚性和抗弯曲性。耐化学性极好，聚丙烯不含极性基团，具有优良的电绝缘性能，但耐低温性能远不如聚乙烯。由于同样的原因，聚丙烯的印刷性与粘合性不好，在印刷或粘合前多需进行表面处理。

由于聚丙烯具有优良的综合性能，故可用作各种机械零件，如法兰、齿轮、接头、把手、轴流风扇叶轮、泵叶轮、汽车方向盘调节盖、仪表盒等。它还可以作各种化工管道、容器、衬里及表面涂层等。利用聚丙烯的优良抗弯曲性，可制作盖和本体合一的箱壳。

在电气工业方面，可以用于电器外壳、电扇、马达罩等。

聚丙烯以薄膜形式包装食品，聚丙烯薄膜可通过吹塑和流延两种方法制成。通过双向拉伸工艺可以提高薄膜的光学性能和强度。聚丙烯薄膜可以通过不同的涂层来改善其热封性、阻隔性。同时，镀铝聚丙烯薄膜有很低的透气及透湿性。尤其是双向拉伸的聚丙烯薄膜（BOPP）其透明性、阻隔性等均优于未拉伸的聚丙烯薄膜（CPP），从而广泛地应用于复合薄膜的制造。高挺度与易拉性能使均聚聚丙烯非常适合于制造缠绕薄膜及拉伸薄膜；聚丙烯还可用来制造瓶、罐及各种形式的中空容器。同时因其具有很好的低极性及耐热性，故可以用这种材料制成耐热的微波食品容器以及耐蒸煮容器。聚丙烯的基本性能见表 2-4。

表 2-4　聚丙烯的基本性能

性　　能	
相对密度	0.90 ~ 0.91
拉伸强度/MPa	29.4 ~ 39.2
弯曲强度/MPa	41.2 ~ 54.9
压缩强度/MPa	27.9 ~ 56.8
断裂伸长率（%）	>200
冲击强度（缺口）/（kJ/m^2）	4 ~ 5
冲击强度（无缺口）/（kJ/m^2）	>8
布氏硬度 HBW	8.65
连续耐热温度/℃	121
脆化温度/℃	−35

（3）聚氯乙烯（PVC）　是一种产量大、用途广的热塑性通用塑料，它在工业、农业和日常生活中获得广泛应用。

聚氯乙烯树脂简称 PVC，它是由氯乙烯单体聚合而成。其分子结构式为：

$$+CH_2-\underset{\displaystyle Cl}{\underset{|}{CH}}+_n$$

聚氯乙烯树脂为白色粉末，密度为 1.4 左右。由于聚氯乙烯大分子中有极性基团氯原子的存在，使分子产生极性，增加了分子间的作用力，比聚乙烯分子间的作用力大。同时，聚氯乙烯大分子链间的密集程度较高，大分子链间距离（2.8 埃）较聚乙烯（4.93 埃）为小，因此，聚氯乙烯具有较大的压缩强度和表面硬度，较小的伸长率。

聚氯乙烯树脂在 65 ~ 85℃开始软化，在 120 ~ 150℃成为完全可塑化状态，在 170℃左右呈熔融状态，至 190℃以上开始分解并急剧地放出氯化氢。因此，加工的适宜温度范围是 150 ~ 180℃。同时在加工时必须加入热稳定剂，否则会因极易分解而无法顺利加工。

聚氯乙烯的氯含量高达 56%，所以它具有耐燃、自熄的特点。

聚氯乙烯的使用温度为 -15 ~ 5℃。聚氯乙烯作为硬质塑料应用时，热稳定性与耐热性都比较差。

聚氯乙烯具有良好的介电性能，是属于介质损耗较小的材料之一。对于交流电和直流电的绝缘能力可与橡胶相比，但它的介电性能随温度升高而变坏，介电性能还与频率有关。频率增高，介质损耗上升，体积电阻下降，故聚氯乙烯只能在低频下使用，不宜在高频下工作。

聚氯乙烯能耐许多化学药品的腐蚀，常温下能耐任何浓度的盐酸、90% 以下的硫酸、50% ~60% 的硝酸和 70% 的氢氧化钠。在室温下不溶于醇、甲酸、醋酸及醚等，但溶于酮类、二氯乙烷、甲酚、吡啶等。此外，汽油、润滑油、苯、甲苯与二硫化碳均可使聚氯乙烯溶胀。

聚氯乙烯的主要用途：

聚氯乙烯树脂在组分中，加入少量的增塑剂和其他助剂，可制成硬质聚氯乙烯，由于聚氯乙烯树脂是无色透明的，因而可制得各种色彩的透明或不透明的塑料制品。

硬质聚氯乙烯具有良好的力学性能，它优于聚乙烯等一般的热塑性通用塑料的强度指标。聚氯乙烯还具有良好的耐化学性能，因此广泛用于制造化工设备。可以作为受力的化工容器和防腐设备的结构材料。在制作时只要合理地选择配方，特别是硬制品，可以加工成各种耐腐蚀的管道、容器和单元设备，可用于输送和贮存腐蚀性的气体、液体。

硬质聚氯乙烯广泛用于制作管材、棒材和板材制品，做建筑和结构材料，如电解槽衬垫、酸碱贮存器、电池隔板和泵的部件等。硬质聚氯乙烯的马丁耐热温度为 60℃，耐热性低，而且材料承受载荷的能力受温度影响较大，硬质聚氯乙烯还具有较大的蠕变、冷流动性，在长时间受负荷的情况下，会产生大的变形和应力松弛，尤其当温度升高时，聚氯乙烯的蠕变更为加大。必须注意，在设计硬质聚氯乙烯制成大型塑料设备时，应该采用塑料的蠕变极限值来计算。聚氯乙烯的膨胀系数比较大，硬质聚氯乙烯的膨胀系数几乎是钢材的 7 ~ 8 倍。因此，当用作与钢材连接或作为钢制设备的衬里时，由于温度的变化，导致工件的胀、缩不匀，过大的应力和变形可能导致硬质聚氯乙烯的破坏。

聚氯乙烯的介电性能因增塑剂的加入而受影响，有时也与采用的稳定剂有关。总的来说，聚氯乙烯为一种优良的电绝缘材料，可与硬橡胶相媲美。在平常使用的温度范围内，硬质聚氯乙烯的介电性能变化甚小，温度升高，介电性能变坏，

但只是在高于 80℃时才开始有显著的改变。硬质聚氯乙烯可以制造如灯座、插头、开关一类的电器、电讯器材；软聚氯乙烯可以制作电线包皮，但由于聚氯乙烯不耐高温，故一般只适用作为室内电灯线等，不宜用于电烙铁、电熨斗和电炉等功率较大、能使电线产生高温的电器用具。并且其使用场所也不要靠近火炉、烟囱等。

聚氯乙烯化学稳定性好，用硬质聚氯乙烯制成的管子在石油化工、电气等部门普遍应用。硬管分轻型、重型两种。常温下的使用压力，轻型管不超过 0.6MPa，重型管不超过 1MPa。由于塑料的导热系数比金属的低得多，所以在同样情况下，塑料管内的水遭冻结的可能性比金属管的要小。并且塑料管具有光滑的内管壁、摩擦阻力也小，因此它输水的流量要比同样粗的铸铁管或钢管大 25% ~30% 。这样就有可能在同样条件下，降低水泵的压力、功率和水塔的高度或减小管道的直径。可用它制作盥洗室、厕所间内的冷水管道。

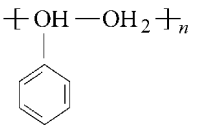
在组分中，加入大量的增塑剂就可制得柔软而富于弹性的软质聚氯乙烯。增塑剂的加入，可以增进材料的可塑性和柔软性，但也将使塑料的力学性能降低。例如，加入 30% 增塑剂时，其抗拉强度为 12 ~16MPa；当加到 80% 时，其抗拉强度就降低到 2MPa。所以，增塑剂的用量通常在 30% ~50% 范围内。软聚氯乙烯塑料的机械强度比硬聚氯乙烯要低得多，显然它不可能承受较大的载荷。软聚氯乙烯的耐热性比硬聚氯乙烯更要差，但是增塑剂的加入可改善塑料的耐寒性。

软质聚氯乙烯除了用于电线的绝缘包皮、各种软管和日用塑料制品外，主要还用以制作薄膜、软板和人造革。

关于聚氯乙烯塑料制品是否有毒的问题，可从它的组分来分析，纯的聚氯乙烯树脂是无毒的，但树脂内所含有的微量未聚合的氯乙烯单体对人体是有害的，另外其对人体产生危害主要在于增塑剂与稳定剂及其他助剂。增塑剂有无毒的，也有有毒的。各国对用于食品和药品包装以及玩具所使用的聚氯乙烯树脂所含的氯乙烯单体的含量和所添加的助剂的品种和数量做了严格规定，只要按照规定使用，就是安全的。

由聚氯乙烯糊状混合物贴覆或涂刮在衬布上制成的各种颜色、质地柔软、富于弹性、具有皮革光泽的人造革。由于聚氯乙烯糊在衬布上的量不同，故人造革又分为薄的和厚的两种。按用途来分，厚的一种可以被覆贴于地板表面、故又称它为地板革。聚氯乙烯人造革可与牛皮、猪皮相比，它具有防水性能好，没有气味，表面脏了可用水擦洗，耐磨、耐酸碱和表面光亮而不退色等一系列优点。因此，广泛用于制皮上衣、手提包、皮箱、手套以及住宅房间、汽车、船舱和火车车厢内的沙发、座椅等内部设备和室内墙壁、地板表面覆盖或包覆材料。不但可以大大地美化环境，而且还可节省大量优质木材。

（4）聚苯乙烯（PS）　简称 PS，分子结构式为：



聚苯乙烯是一种常用的热塑性通用塑料，也是目前世界上应用最广的塑料之一。

聚苯乙烯质脆、不耐沸水、耐油性很有限。为了改善聚苯乙烯的某些性能，以满足制品要求，出现了不同级别的聚苯乙烯树脂。聚苯乙烯树脂可分为：

1）通用级聚苯乙烯：这种级别的聚苯乙烯在耐热性、流动性和耐冲击性方面均一般。

2）高相对分子质量聚苯乙烯：通常，聚苯乙烯的相对分子质量低于 5 万，则其强度性能较差。随着相对分子质量的提高，例如相对分子质量达 10 万，则其强度性能提高很快。当相对分子质量超过 10 万，其强度性能不但没有明显提高，反而使流动性变得较差。高相对分子质量聚苯乙烯主要用于耐冲击而又需要透明的场合。

3）耐热聚苯乙烯：通过降低聚合物中残存的挥发性单体，可以提高聚苯乙烯的软化点。一般说来，耐热聚苯乙烯的软化点比通用级要高 7℃左右。

4）易流动级聚苯乙烯：在低相对分子质量聚苯乙烯中引入内润滑剂（如硬脂酸丁酯或液态石蜡）和外润滑剂（如硬脂酸锌），并且适当地控制粒度，则可改善它的流动性，使软化点降低，而对其他性能影响较小。这种材料适用于注射壁薄和形状复杂的制品。

聚苯乙烯是热塑性塑料。一般的聚苯乙烯是无规聚合物。聚苯乙烯在常温下是质硬、透明、无定形的树脂。

聚苯乙烯是无色透明的塑料，其透光性能仅次于有机玻璃，表面富有光泽。它的密度小、耐蚀性能好。特别是它的电性能极好，所以是高频绝缘方面不可缺少的材料。

聚苯乙烯能溶解在某些碳氢化合物中，与丁苯橡胶、醋酸纤维的相溶性好，但与聚乙烯、聚氯乙烯等相容性差。利用它和某些聚合物的良好相溶性可制得一些共聚物。

聚苯乙烯受阳光的作用会泛黄。除此之外，在聚合过程中，单体中带色杂质的存在会引起泛黄。

聚苯乙烯的主要缺点是抗冲击强度低、易脆裂、耐热性不高。聚苯乙烯具有一定的机械强度，但比硬聚氯乙烯略低一些，尤其是抗冲击韧性低得多，性质较脆，仅能在低负荷下使用。聚苯乙烯的耐热性也不高，马丁耐热温度为 75℃。它的强度指标随着温度的增加而降低。为此，可对聚苯乙烯进行改性。例如：

1）用丁苯橡胶改性聚苯乙烯，可提高聚苯乙烯的韧性和冲击强度。

2）组成苯乙烯 – 丙烯腈共聚体。由于引进了极性丙烯腈，比聚苯乙烯有更高的冲击强度和优良的耐热性、耐油性、耐化学腐蚀性，刚性也提高。

聚苯乙烯的可塑流动性极好，再加上它的成型收缩性较小，故它是注射成型加工中最好的塑料品种之一，适于制造形状复杂、细长的塑料制件。

由于聚苯乙烯树脂无色透明、透光性好、着色性也好，因而可以制得种种色彩鲜艳的塑料制品。聚苯乙烯主要用于各种仪表外壳、汽车灯罩、仪表指示灯罩、化工贮酸槽、酸运输槽（特别是氢氟酸）、化学仪器零件、电讯零件、电工绝缘材料。

聚苯乙烯通过改性，可以扩大其应用范围。用丁苯橡胶改性的聚苯乙烯有较高的力学性能，可用于制各种仪表外壳等。AS 树脂（即苯乙烯 – 丙烯腈共聚体）广泛用作耐油、耐热、耐化学药品的零件，例如制耐油机械零件、仪表壳、电池盒、接线盒，各种开关、按钮等。

微小的吸水性是聚苯乙烯又一个特点，吸水率仅为 0. 05% 。聚苯乙烯塑料制品的形状和尺寸几乎不受温度的影响。

由于聚苯乙烯分子结构中不含极性基团，所以聚苯乙烯是一种优异的电绝缘材料。通常的材料介质损耗均随频率的提高而提高，而聚苯乙烯的介质损耗在高频下仍是很低的。因此，它能作为高频绝缘材料广泛地用于各类电子设备中的绝缘零件。

聚苯乙烯还可以进行发泡，发泡聚苯乙烯有许多优点，如保温性好、缓冲性能好等，主要应用于各类电器的缓冲包装、食品包装以及鲜鱼的活体包装箱等。

聚苯乙烯的缺点是抗冲击性能差、脆性大，有时聚苯乙烯塑料制品在使用时会自行发生小裂纹，尤其是遇有溶剂、受热、受震的情况时，更易发生碎裂等弊病。所以，在制得聚苯乙烯塑料制品后应进行热处理退火——缓慢冷却，以减轻或消除塑料制品中的内应力。聚苯乙烯的基本性能见表 2-5。

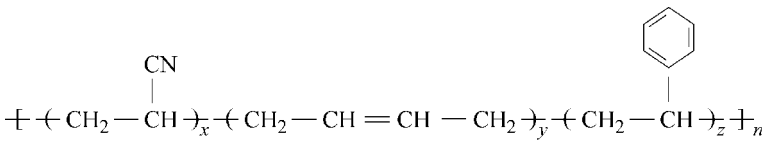
表 2-5　聚苯乙烯的基本性能

性　　能	普通聚苯乙烯	改性聚苯乙烯
相对密度	1. 04 ~ 1. 09	1. 04 ~ 1. 10
洛氏硬度 HRC	65 ~ 80	20 ~ 90
拉伸强度/MPa	35 ~ 84	8. 4 ~ 10. 5
断裂伸长率（%）	7. 0 ~ 17. 5	14. 0 ~ 56. 0
冲击强度（悬臂缺口）/（kJ/m^2）	0. 54 ~ 0. 86	1. 1 ~ 23. 6
压缩强度/MPa	80. 5 ~ 112	28 ~ 112
连续使用温度/℃	60 ~ 80	60 ~ 80

2. ABS 塑料

ABS 塑料是在聚苯乙烯改性共聚物上发展起来的一大品种，是一种原料易得、综合性能优良、价格便宜的工程塑料。ABS 树脂是由丙烯腈 – 丁二烯 – 苯乙烯三

种组分所组成。其中 A 代表丙烯腈，B 代表丁二烯，S 代表苯乙烯。因此 ABS 兼有三种组分的优点，有较好的综合性能。其分子组成为：



ABS 具有聚苯乙烯的良好成型加工成型性，聚丁二烯的橡胶状韧性和弹性，聚丙烯腈的高化学稳定性、表面硬度和耐化学腐蚀性等，使其成为“坚韧、质硬、刚性”材料。它不仅性能良好，加工容易，而且价格低廉，所以获得了极其广泛的应用。

改变 ABS 树脂中三种组分之间的比例，可以在适当的范围内调节其性能，以适合各种特殊的应用。按其配料组成的不同，ABS 树脂分为通用型、中冲击型、高冲击型、耐低温冲击型、耐热型和耐燃型等品种。因此，可按不同的要求选择不同型号的树脂制造各种制品。

ABS 塑料具有较高的冲击韧性，良好的力学性能，以及一定的表面硬度和耐磨性。特别是从改进聚苯乙烯性能这一角度来看，ABS 显著地提高了抗冲强度，从而扩大了聚苯乙烯类树脂的应用。

按 ABS 树脂品种和所加载荷的不同，ABS 的热变形温度为 65 ~ 120℃。对于通常的注射料和挤出料，其热变形温度约为 90℃。它的热变形温度比聚苯乙烯、聚氯乙烯高。大多数 ABS 塑料在 -40℃下仍有相当的抗冲强度，表现出较大的韧性。

ABS 的吸水率低，几乎不受水分影响。在室温下浸在水中一年，其吸湿率不超过 1%。

ABS 树脂是不透明的，呈浅象牙色，故能配成各种鲜艳颜色。采用抛光或研磨模具成型的 ABS 塑料，能得到高度光泽的制件，其质硬且表面光滑，不需特殊处理就可作为装饰件。这种塑料的外表还可进行电镀、印刷、喷漆和绘画装饰等。

总之，ABS 树脂具有耐热、表面硬度高、尺寸稳定、耐化学性及电性能良好、易于成型和机械加工等特点。由于 ABS 树脂的综合性能良好，在机械工业、电气工业、纺织工业、汽车、飞机、轮船等制造工业，以及化学工业等方面广泛地得到应用。

在电气工业方面用 ABS 树脂具有良好的电绝缘性能，可制成各种电器等机器设备外壳及各种制件。

用 ABS 树脂做飞机机舱内的花纹装饰板、仪表盘、机罩等，可以减轻飞机重量。在汽车工业上可以用来制作方向盘、手柄、仪表盘、汽车外壳等。在化学工业上可用做低浓度的酸、碱溶剂生产用的装置，管道和容器。

ABS 加工成型性能好，且尺寸稳定，收缩率小（0.5% ~0.8%），故可成型具有一定尺寸精度的零件，还可以制造形状复杂的塑料件。同时，它具有很容易和其

他塑料、橡胶混溶的特点，利于对材料的改性，可以制成满足多种需求的塑料品种。

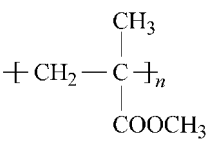
ABS 树脂的缺点是耐热性不够高、不耐燃、不透明和耐候性不好。可以采用增加其他种单体或更换单体和添加助剂、填料等方法对其改性，制得具有耐热、耐寒、耐燃、耐候等特点的塑料。各种类型 ABS 的性能见表 2-6。

表 2-6　各种类型 ABS 的性能

	项　　目	超高冲击型	高强度中冲击型	低温冲击型	耐热型
物理性能	密度/（g/cm^3）	1.05	1.07	1.02	1.06～1.08
	吸水率（24h）（%）	0.3	0.3	0.2	0.2
热性能	热变形温度（0.46MPa）/℃	96	98	98	104～116
	（1.86MPa）/℃	87	89	78～85	96～110
	线胀系数/（$\times10^{-5}$℃）	10.0	7.0	8.6～9.9	6.8～8.2
	燃烧性（>1.27nm 厚）/（mm/s）			0.55	0.55
力学性能	拉伸强度（极限）/MPa	35	63	21～28	53～56
	（屈服）/MPa			21～28	53～56
	拉伸弹性模量/MPa	1800	2900	700～1800	2500
	弯曲强度/MPa	62	97	25～46	84
	弯曲弹性模量/MPa	1800	3000	1200～2000	2500～2600
	压缩强度/MPa		1	18～39	70
	硬度（洛氏 B）	100	121	62～88	108～116
	冲击强度　23℃	5.3	6	2.7～4.9	1.6～3.2
	（带缺口）/J　0℃			2.1～3.2	1.1～1.3
	－40℃			0.8～1.89	0.16～0.54
	受载变形（50℃，1.41MPa）（%）				0.4

3. 聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）

聚甲基丙烯酸甲酯俗称有机玻璃（下称有机玻璃）。它是丙烯酸树脂中产量大、用途广的一个塑料品种，由甲基丙烯酸甲酯聚合而成。它的分子结构式为：



高度的透明、无色、洁净和良好的透光性，是有机玻璃最突出的特点，为目前最好的有机透明材料。其透光率为 92%，比普通的无机玻璃（透光率为 88%）还

要高。有机玻璃能透过 73% 的紫外光线，而普通玻璃只能透过 0.6% 。普通玻璃的厚度超过 15cm 时，颜色呈绿色且不透明，而有机玻璃却在厚为 1m 时还可以透过光线，并且仍然清晰透明到能透过它清楚地阅读报纸。由于它是一种用塑料做的玻璃状材料，故称为“有机玻璃”。

由于有机玻璃的透明性好和便于加工，所以它在光学仪器、模型和标本制造方面得到了广泛的应用。用它制作的教学模型，从外面就能清楚地看到内部的构造和动作。此外，可以把小昆虫的标本埋藏在有机玻璃内，观察起来十分清晰，就好像自然界的琥珀中封固着小虫一样。在生物学展示中可以用这种方法来保存珍贵的标本。

有机玻璃还具有特殊的曲折传递的光学性能，如用表面极光滑的有机玻璃片或棒在一定的弯曲限度内，能让从一端射入的光线全部在树脂片或棒的内部反射前进，像水在橡皮管中流过一样，最后从另一端射出。所谓一定的限度就是折屈的角度不能超过 40°，在弯曲成弧形时，弧形半径必须大于棒的直径或片厚度的 3 倍。利用有机玻璃能曲折传导光线的特性，便可将光传送到不能照射的地方去，制造边缘发光的标志和外科医疗用具等装置。飞机，汽车和机车驾驶用的仪表板，也有采用这种照明装置的。这时，把刻有记号的有机玻璃塑料仪表板，弯成一定曲度的弧形，在其两端装置电灯，使光沿弧形板弯曲入板，则板上的全部记号就可以清晰地显现出来，不需再在板前另加照明。

有机玻璃不仅透明洁净，而且也容易着色。如果在组分中加入荧光剂，可制得荧光有机玻璃；加入珍珠粉，可制得珠光有机玻璃。从而可以制成不同颜色、透明或不透明的有机玻璃装饰制品。这对于房间内部的装饰、美化灯光等也会取得满意的效果。

有机玻璃还有一个显著优点是质轻而坚韧。有机玻璃的相对密度为 1.19，只有普通玻璃的一半左右。普通玻璃又硬又脆，一摔就碎。可是，有机玻璃碰击不碎，比普通玻璃要坚韧得多，为普通玻璃的 20 倍左右。长期以来，普通玻璃的根本缺点是性脆、经不起碰击、易碎裂、碎片会飞散伤人。显然，这种玻璃在高速、振动、时有冲击的交通工具上应用是不妥当的。以前曾经出现过一种安全玻璃，是用透明的有机合成胶粘剂，把两片普通玻璃粘在一起。这种安全玻璃的抗击能力要好些，破裂时不致碎片四散，可是它又厚又重，不能满足运输工业、特别是航空工业的要求。有机玻璃问世以来，已成功地应用于现代飞机座舱罩和风窗玻璃。当飞机以超音速飞行时，有机玻璃能承受极大的风压而不被破碎。同样它也适用于制作汽车和机车的风窗玻璃、车辆的窗玻璃以及公务瞭望车上带有曲弧的整块大玻璃等。由于它坚韧不碎，故车窗玻璃可以由厚度 5mm 减为 3mm。

此外，有机玻璃还具有优越的耐候性、耐紫外线和防大气老化性。其制品即使在户外放置五年后，性能下降仍很少，如透光率仅下降 1% 。

与一般热塑性塑料一样，有机玻璃的耐热性能不高，马丁耐热温度为 60℃ 。

其物理、力学性能也是随温度的变化而改变的。有机玻璃的热胀系数大，当将有机玻璃装入金属骨架时，应该考虑由温度差异而产生的内应力。

有机玻璃还存在一个缺点，即它的硬度远不及普通玻璃。由于它表面硬度和耐磨性低，故有机玻璃很容易被擦伤而起毛。但这个问题并不只限于有机玻璃，可以说大多数塑料都存在这个缺点。不过，因为有机玻璃通常用作透明材料，这一缺点就特别引人注目了，这也正是有机玻璃不能广泛代替无机玻璃应用的一个重要原因。因此，平常使用它时要注意防护，防止坚硬的物体触及划伤。

4. 聚酰胺（PA）

聚酰胺俗称尼龙（以下称尼龙），是一种应用广泛的热塑性工程塑料。现有的尼龙品种很多，但实际应用较广的有尼龙 6、66、610、1010、铸型尼龙（MC 尼龙）和芳香尼龙等。其中尼龙 1010 是我国独创的，是用蓖麻油为原料，提取癸二胺及癸二酸缩合而成的。此外，还有如尼龙 6/66 及尼龙 610/1010/6 等二元、三元共聚体等。

尼龙名称后面的数字是表示组成这种高聚物中的链节所含的碳原子数。制造尼龙的方法有两种：一种是由氨基酸脱水制成内酰胺，然后再聚合，称为尼龙 X；另一种是由二元酸与二元胺反应获得，成为兼含酰基和氨基的线型高分子化合物，称为尼龙 XY。其中 X 为氨基酸中的碳原子数；XY 分别为二元胺与二元酸中的碳原子数。尼龙的命名就是以这些碳原子数为依据的。由于所具有的碳原子数目的不同，因而得到了不同品种的聚酰胺。例如，尼龙 6 是由含有 6 个碳原子的己内酰胺自身聚合而得。尼龙 66 是由含有 6 个碳原子的己二胺和含有 6 个碳原子的己二酸缩聚而成的。这些品种的尼龙在结构、性能上有共同点，也有不同点。总的来说，尼龙具有良好的综合性能。

不管哪种尼龙，其大分子链段中都重复出现有酰胺基团$\left(+\overset{\overset{O}{\|}}{C}-NH+\right)$，这是一个极性基团，这个基团上的氢能够与另一个酰胺基团链段上电子的羰基$\left(-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-\right)$结合形成相当强力的氢键：

$$
\begin{array}{c}
\qquad\qquad\qquad\quad O \\
\qquad\qquad\qquad\quad \| \\
-CH_2-C-N-CH_2- \\
\qquad\qquad\qquad\quad | \\
\qquad\qquad\qquad\quad H \\
\qquad\qquad\qquad\quad \vdots \\
\qquad\qquad\quad H\qquad O \\
\qquad\qquad\quad |\qquad \| \\
-CH_2-N-C-CH_2-
\end{array}
$$

这样，大分子链之间作用力很大，链的内旋转受阻，使结构发生结晶化，导致

熔点升高，使成型产品有良好的韧性、耐油和耐溶剂性，优良的力学性能，一定的吸水性和耐热性。但形成这种氢键的多少与分子链中两极性基团之间的碳原子数有关。碳原子数较少，相对来说氢键较多，使其熔点、机械强度都较高；而吸水性增加又会导致尺寸稳定性较差。另一方面，分子链中碳原子数目相当多的尼龙 11、12 形成的氢键较少，成品的结晶性就比较低，而柔韧性、耐低温力学性能好，吸湿性很低、熔点低，尺寸稳定性较好。因此，我们可以根据不同的使用要求来选择品种。

尼龙具有较高的力学性能，比硬质聚氯乙烯的强度还要好，尼龙 6 抗拉强度为 58 ~ 78MPa。由于尼龙的弹性好，因而能吸收冲击，振动时发出的噪声较小，用它制成的零件有良好的消音效果。

与其他种类的塑料相比，一般聚酰胺塑料由于含有极性的酰胺基团，故它的吸水性比较大，这对于工程塑料的应用来说是一个缺点。其中尼龙 6 的吸水性尤为突出，它 24h 的吸水率为 2% 左右，饱和吸水率最高可达 10% 。这样，湿度对制件尺寸和强度都会有很大的影响。当其含水率增加时，体积增大，强度下降，但韧性却得到了提高。在设计精密的尼龙轴套制品时，这一特性应予考虑，设计制造时比一般的铜套要加大间隙，防止发生卡轴故障。

尼龙的热稳定性较差，制件必须在 100℃以下使用。在有载荷的情况下，实际使用温度还要更低些，通常在 70 ~ 80℃。尼龙与聚乙烯、聚苯乙烯等一般热塑性塑料不同，并不随温度上升而逐渐软化，它具有比较明显的熔点。尼龙 6 的熔点为 215℃，在 150℃以下看不出有显著变形，其强度指标随温度的升高而不同。

常温下，稀酸对尼龙不发生影响，浓酸会引起尼龙膨胀并逐渐溶解。在浓度较高的酸和高温同时作用下，尼龙会发生明显的破坏。尼龙制品于 10% 碱内贮存 3 个月后，其制品未发生明显膨胀，只是色泽变深，呈红褐色。

MC 尼龙是尼龙塑料中的一个特殊品种。它不像一般注射成型那样先将单体聚合，然后挤出造粒，最后才能注射成型，而是于常压下将熔融的己内酰胺单体用强碱性物质作催化剂，直接注入模具内快速聚合而成，故又称为单体浇铸尼龙。

MC 尼龙的性能基本上与尼龙 6 相仿，但由于它具有很高的相对分子质量（可达 3. 5 万 ~ 7 万，而尼龙 6 为 2 万 ~ 3 万）和较高的结晶度（达 45% ~ 52%，而尼龙 6 为 28% ~ 40%），因此各项物理、力学性能都比尼龙 6 要好。其抗拉强度达 88MPa 左右，布氏硬度为 20HBW 左右；它的摩擦、耐磨性能可与聚甲醛媲美，并具有较好的自润滑性能；耐热性比尼龙 6 好，而与尼龙 66 相近，使用温度为 80℃；MC 尼龙的吸水性比尼龙 6 小，其吸水率为 0. 9% 左右。

尼龙具有优良的耐磨性，可以代替青铜和其他贵重合金，用以制造耐磨机械零件。尼龙与金属材料相比，其摩擦因数要小得多。更可贵的特点是在干摩擦时，尼龙有良好的自润滑性。它特别适用于制作纺织、食品机械的轴承、齿轮、滚子、辊轴等和交通工具走行部的轴套等制品。为了考虑到工作中摩擦热的排除，它最好与

金属材料配对使用。用尼龙粉末喷涂于机床的导轨、拖板等零件表面，对于提高其耐磨性方面已取得了满意的效果。汽车上采取尼龙轴套的结果表明，它经久耐用，同时对金属轴的磨损也较少。由运动试验知道：采用尼龙轴套时，对轴的精度有一定的要求，一般以光滑为好。如果轴颈表面过分粗糙，对尼龙轴套的磨损影响将很厉害。

不同品种的尼龙其性能也有差异，见表 2-6。在力学性能方面，以尼龙 66 和尼龙 6 的强度指标为最高，其他品种的强度和硬度指标大致是随着碳链的增加而逐渐下降的。

尼龙常用来代替有色金属及其合金，用以制造齿轮、螺钉螺母等。不仅机械强度较高，而且特别耐油、耐腐蚀、消音、减振。由于尼龙耐磨，自润滑性好，作为轴承材料也超越其他一般工程塑料。含石墨的尼龙作为轴承材料具有特殊的优点。下面就常用尼龙品种的应用介绍如下：

（1）尼龙 1010　半透明，吸水性较小，对光的作用也较稳定，可在 80℃以下长期使用；耐寒，在 –60℃不致发脆；不溶于弱碱、醇、酯、酮和汽油，但溶于苯酚、浓硫酸及低分子有机酸中。主要用于机械零件如油管、螺母、轴承等。在机床液压系统中，用尼龙 1010 管代替纯铜管作输油管，重量轻而且可以随时观察油的循环情况。此外，填充石墨或二硫化钼的尼龙 1010 可作各种机械上的齿轮。玻璃纤维增强的尼龙还可以用作水泵叶轮和叶片等。

（2）尼龙 6　弹性较好，冲击强度高。与尼龙 66 相比，刚性小、熔点低。加工性能比其他尼龙更易控制，高粘度的易于挤出成型，低粘度的易于制成薄膜及复杂零件。尼龙 6 的介电常数较大，不宜用于高频低损耗方面。但柔软性好，低温脆化温度为 –20 ~ –30℃，适用于机械、仪表仪器等零件及电缆护套等。玻璃纤维增强的可制齿轮和真空泵叶片等。

（3）尼龙 66　性韧、色白、半透明，是尼龙中强度较高的一种。比尼龙 6 及尼龙 610 的拉伸屈服强度大。在较宽的温度范围内仍有较高的强度、韧性、刚性、抗蠕变性和耐疲劳性以及低的摩擦因数。耐磨及吸水性稍低于尼龙 6。用途基本上与尼龙 6 相同。

（4）尼龙 610　半透明，很多方面的性能与尼龙 6 类似。但吸水性较低，尺寸稳定性和电性能较好，熔点较低、刚性较小、能燃烧，但自熄。应用范围与尼龙 6、尼龙 66 相仿，可用于尺寸稳定性要求较高的制品。

（5）铸型尼龙（MC 尼龙）　用碱催化，可以浇铸成型的尼龙 6，称为铸型尼龙（MC 尼龙）。MC 尼龙的相对分子质量比一般尼龙 6 高一倍左右，因此各项物理、力学性能也比尼龙 6 高。MC 尼龙的特点是工艺设备和模具都很简便，可自行制取几公斤到几百公斤的制件。但由于 MC 尼龙成型所需要的时间较长，故它适合于多品种、小批量产品和注射机难以成型的、有数十公斤重的大型齿轮、蜗轮和轴承、轴套等大型机械零件的制造。但产品易吸水，尺寸稳定性较差。

（6）芳香尼龙　它是由芳香胺与芳香酸缩合而成的，具有耐磨、耐热、耐辐射和突出的电绝缘性能，在95%相对湿度的环境下不受影响，能在温度200℃的情况下长期使用。它是所有尼龙中耐热性最好的一种。可制作在高温下耐磨的机械零件、耐热绝缘材料和宇宙服等。

各种尼龙的综合性能见表2-7。

表2-7　各种尼龙的综合性能

项　　目	尼龙6＊	尼龙9	尼龙11	尼龙12	尼龙1010	尼龙66＊	尼龙610＊
密度/（g/cm^3）	1.13～1.15	1.05	1.04	1.09	1.04～1.06	1.14～1.15	1.08～1.09
拉伸强度/MPa	58～65	58～65	57	45～50	52～55	57～83	47～60
压缩强度/MPa	60～90					90～120	70～90
弯曲强度/MPa	70～100	80～85	50～76	86～92	82～89	100～110	70～100
冲击强度 （带缺口）/J （不带缺口）/J	0.31	25～30	0.35～0.48	11～12	0.4～0.5 ＞69	0.39	0.315～0.55
伸长率（%）	150～250		60～230	230～240	100～250	60～200	100～240
弹性模量/MPa	830～2600	970～1200	1200		1600	1400～3300	1200～2300
硬度 （洛氏B） （布氏）	85～114		100～133 7.5		7.1	100～118	0～113 9
熔点/℃	215～223	209～215	180～230	178	200～210	265	210～233
马丁耐热/℃	40～50	42～48	（38）		45	50～60	51～56
维卡耐热/℃	160～180	＞160	173～178		123～190	220	195～205
比热容/［kJ/（kg·℃）］	0.168～0.21	0.37			0.21	0.17～0.21	0.17～0.21
导热系数 /［kJ/（m·h·℃）］	0.76～1.22					0.93～1.22	0.8～1.05
线胀系数/（×10^{-5}/℃）	7.9～8.1	8～12	11.4～12.4		10.5	9.1～10.9	9.0～12
吸水率（%）	1.9～2	1.2		1.5	0.39	1.5	0.5

注：带＊号的尼龙6，66和610等由于吸水性很大，因此，其性能上、下限差别很大。

5. 聚甲醛（POM）

聚甲醛是继尼龙之后发展起来的一种高强度热塑性工程塑料，它是白色、没有侧链、具有线型结构的高密度、高结晶性的线型聚合物，有明显的熔点和较好的热稳定性，具有优异的综合性能。聚甲醛的拉伸强度达70MPa，可在104℃下长期使用，脆化温度为－40℃，吸水性较小。这些优越的物理、力学性能都超过了尼龙，因此近年来广泛被用来制造各种类型的机械零件。聚甲醛热稳定性较差，所以必须

严格控制成型加工温度。聚甲醛遇火会燃烧，长期在大气中曝晒还会老化。

聚甲醛按分子链化学结构不同，可分为均聚甲醛和共聚甲醛两种。均聚甲醛是以精制三聚甲醛为原料，以三氟化硼乙醚络合物为催化剂，在石油醚中聚合，产物再经端基封闭而得稳定的聚合物。其分子结构式为：

$$CH_3-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-O+CH_2O\rightarrow_n \overset{\overset{O}{\|}}{C}-CH_3$$

其中，$n=1000\sim1500$。

共聚甲醛是以三聚甲醛与少量二氧五环为原料、三氟化硼乙醚络合物为催化剂共聚而成，再经后处理除去大分子链两端不稳定部分。其分子结构式为：

$$[+CH_2-O+_x+CH_2-O-CH_2-O-CH_2+_y]_n$$

其中 $x:y=95:5$ 或 $97:3$。

从以上结构式可以看到，均聚物是由纯—C—O—键连续构成的，而共聚物则在—C—O—键上平均分布—C—C—键。后者较前者稳定，在降解反应中—C—C—键是终止点。但是—C—O—键比—C—C—键距离短，键轴方向的填充密度大，所以两者性能上略有差异。其中，均聚聚甲醛的密度、结晶性、机械强度均较高，而热稳定性则较差。

聚甲醛的力学性能比一般塑性塑料高，甚至比尼龙高。这种材料的突出特性是具有高的弹性模量（2.9×10^3MPa）、很高的硬度和刚性。聚甲醛另一个重要的特点是具有良好的耐疲劳性，其抗疲劳强度为 25 ~ 34MPa（尼龙 6、尼龙 66 为 20 ~ 21MPa），是热塑性工程塑料中较好的一种。聚甲醛还具有较好的冲击韧性，特别是可耐多次重复冲击。此外，聚甲醛的复原弹性好，在载荷除去后即能迅速复原，因此可用来制作塑料弹簧制品。

聚甲醛有较高的热变形温度，它的工作温度通常在 100℃左右。与其他热塑性塑料一样，聚甲醛具有随温度的升高而强度降低的趋势，但是它受温度的影响并不明显。当它自室温升至 40℃时，其变化不大；当温度继续升高时，聚甲醛的机械强度才有所降低。

聚甲醛的吸水性比较低，其吸水率一般为 0.2% ~0.25%，因此湿度对聚甲醛塑料制品的尺寸影响较小。即使在潮湿环境下使用，它也具有很好的形状稳定性。

聚甲醛还具有优良的耐磨性，其摩擦因数低。对钢铁表面的摩擦因数非常低，特别重要的是，聚甲醛的静摩擦因数和动摩擦因数之间的差别很小，因而使用中不会产生打滑现象；另外，聚甲醛也不会粘附于对应物的表面。聚甲醛要比常用的工程塑料的耐磨性好，因此聚甲醛和尼龙一样特别宜于制作各种结构的摩擦件，还适用于某些不允许有润滑油情况下使用的自润滑轴承、齿轮等，从而解决了一些关键性技术问题，已广泛地用于机械、电机、通信和交通运输工业。

聚甲醛具有较好的电绝缘性。因为尼龙的吸水性大，故湿度对其介电性能表现

出不同程度的影响。然而，聚甲醛材料吸水性小，故其介电性能并不随湿度的改变而有多大的变化，即使聚甲醛暴露于高湿度或完全浸没在水中，仍能很好地保持其优良的介电性能。

长期暴露于强烈紫外线辐射下的聚甲醛，其冲击强度会显著下降。在中等程度的紫外光辐射下，也会导致材料表面粉化、龟裂和机械强度下降。含有炭黑等紫外线吸收剂的聚甲醛，能改善其耐候性。

由于均聚物和共聚物的结构不同，故它们的耐蚀性也不完全一样。共聚物的耐蚀性较好，它能耐强碱，而均聚物只能耐弱碱。它们共同的缺点是均不耐强酸和氧化剂，只是对于浓度低的酸及弱酸有一定的耐蚀性。

聚甲醛的综合性能列于表 2-8。

表 2-8　聚甲醛的综合性能

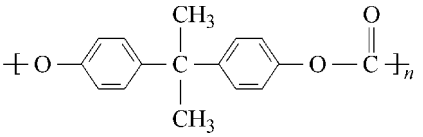
项　目	均聚甲醛	共聚甲醛
密度/（g/cm^3）	1.43	1.41
结晶度（%）	75～85	70～75
熔点/℃	175	165
成型收缩率（%）	2.0～2.5	2.5～2.8
吸水率（24h）（%）	0.25	0.22
线胀系数（0～40℃）	8.1～10.0	9.0～11.0
马丁耐热/℃	60～64	57～62
脆化温度/℃		-40
拉伸强度/MPa	70	62
伸长率（屈服）（%）	15	12
冲击强度（无缺口）/J	10.8	9～10

聚甲醛具有良好的物理、力学性能和化学性能，可以代替各种有色金属及其合金。在汽车、机床、化工、电气、仪表、农机等行业都有使用价值，一般可用来制造轴承、凸轮、波轮、辊子、齿轮、阀门上的阀杆螺母、垫圈、法兰、垫片、汽车仪表板、化油器、各种仪表外壳、罩盖、箱体、化工容器、泵叶轮、鼓风机叶片、配电盘、线圈座、弹簧、管道等零件。

聚甲醛特别适用于轴承使用，因为它具有良好的摩擦磨损性能，尤其是优越的干摩擦性能。因此，被广泛地应用于某些不允许有润滑油情况下使用的轴承、齿轮，从而解决了一些技术问题。用 5% 聚四氟乙烯共混的聚甲醛，其摩擦磨损性能有显著改善。在无润滑条件下，耐磨性和 pv（压力和速度的乘积）值可大大提高。

6. 聚碳酸酯（PC）

聚碳酸酯是一种优秀热塑性工程塑料。它的品种很多，现有商品牌号的大部分为双酚 A 型聚碳酸酯，它是由双酚 A 钠盐与光气经缩聚反应制得。其化学结构式为：



聚碳酸酯的分子链中有刚性的苯环，又有柔顺的醚键，这使它具有优良的综合性能。

聚碳酸酯树脂是透明的，呈淡黄色。它可制得接近无色透明的塑性制品，加入着色剂后，可染成色彩鲜艳的各种装饰塑料制品。聚碳酸酯具有良好的透光能力，透光率达 75% ~88%，已接近有机玻璃的光学指标，所以在光学照明上的应用逐年扩大，它可作大型灯罩、信号照明灯、防护玻璃、窗玻璃等。

聚碳酸酯的吸水性在热塑性塑料中是比较小的，吸水率为 0.13%，故制品尺寸的变化很小。另外一方面，聚碳酸酯模塑成型后收缩率也小，为 0.5% ~0.8%，比尼龙（1% ~2.5%）和聚甲醛（2% ~3%）都小。当塑料制品从模具中取出冷却到室温时，制品并不发生多大的型后收缩，所以聚碳酸酯具有良好的尺寸稳定性，适于制造高精度的塑料制品，如光学仪器零件等。

聚碳酸酯具有优异的力学性能，在一般热塑性树脂中是最优良的，它的弹性模量较高，受温度影响极小。拉伸强度和弯曲强度与尼龙及聚甲醛差不多，具体性能见表 2-9。聚碳酸酯的抗蠕变性能优于尼龙和聚甲醛。在相当高的温度下其蠕变值较小，这是聚碳酸酯尺寸稳定性好的另一个重要标志。聚碳酸酯的抗冲击强度特别突出，为 7 ~8MPa，比尼龙、聚甲醛高 10 倍左右，接近于热固性聚酯玻璃钢，是一般热塑性塑料中最好的品种之一。聚碳酸酯具有中等的摩擦因数和耐磨特性。相对来说，它的摩擦因数及耐磨性比尼龙、聚甲醛等要差些，因此它是一种中等的耐磨性材料。

表 2-9　聚碳酸酯的力学性能

项　　目	数　　值
拉伸强度/MPa	66 ~70
伸长率（%）	100 左右
拉伸弹性模量/MPa	2200 ~2500
弯曲强度/MPa	106
压缩强度/MPa	83 ~88

（续）

项　　目	数　　值
冲击强度（无缺口）/J	不断
（缺口）/J	64 ~ 75
洛氏硬度（M）	75
布氏硬度 HBW	97 ~ 104

聚碳酸酯的熔点较高，在 220 ~ 230℃时呈熔融状态，有流动性差和遇冷收缩快等特点，对成型条件要求较高。聚碳酸酯的马丁耐热度为 110 ~ 130℃，比尼龙和聚甲醛要高出许多。聚碳酸酯在 120℃以下具有良好的耐热性，热变形温度为 130 ~ 140℃。聚碳酸酯同时又具有良好的耐寒性，它的脆化温度为 - 100℃。其塑料制品可在 - 60 ~ 120℃温度范围内长期使用。具体热性能见表 2-10。

表 2-10　聚碳酸酯的热性能

项　　目	数　　值
熔点/℃	220 ~ 230
热变形温度（1.86MPa）/℃	130 ~ 140
马丁耐热/ ℃	110 ~ 130
维卡耐热/ ℃	165
脆化温度/ ℃	- 100
导热系数/［kJ/（m · h · ℃）］	0.7
线胀系数（$\times 10^{-5}$/℃）	6 ~ 7
燃烧性	自熄

聚碳酸酯无臭、无味，室温下耐水、稀酸、氧化剂、还原剂、脂肪烃和环烃的性能良好，但它受碱、胺、酮、酯、芳香烃的侵蚀，并溶解在三氯甲烷、二氯乙烷、甲酚等溶剂中。长期浸在沸水中，也会引起水解或破裂。在某些化学试剂（如四氯化碳）中，聚碳酸酯可能会发生“应力开裂”现象。一般来说，聚碳酸酯与润滑脂、油和酸不起作用，在纯汽油中也是稳定的，但对辛烷值高的汽油稍受影响。那是因为含有芳香族化合物的缘故。

聚碳酸耐候性好，能抵御日光、雨水和气温激烈变化的影响，制品露置室外三年后稍泛黄，但性能并不发生多大变化。聚碳酸酯能吸收紫外线并被侵蚀，因此对于使用于紫外线照射下的制品，必须加入紫外线吸收剂。

聚碳酸酯的疲劳极限强度在 10^7 时为 7 ~ 10MPa，低于尼龙和聚甲醛。因而在循环或振动条件下工作的塑料制品，应注意其最大允许应力为 7MPa。

聚碳酸酯最大的缺点是制品极易开裂，一般为应力开裂和溶剂开裂。适当提高模具温度或对制品进行热处理，可减少制品的内应力。用聚碳酸酯加工制品时，尽

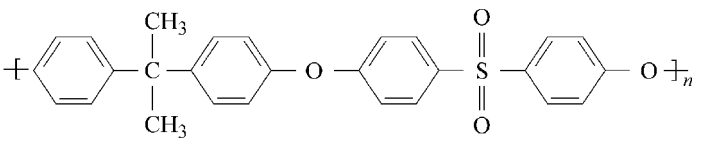
量不加金属嵌件，也能减少制品开裂的可能性。

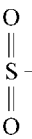
聚碳酸酯目前在机械、仪表、电信、交通、航空、光学照明、医疗器械方面广泛应用。在机械工业方面，由于聚碳酸酯强度高、刚性好、耐冲击、耐磨，尺寸稳定性好，可作轴承、齿轮、蜗轮、蜗杆等传动零件的材料。它在经济上的价值是减轻设备重量，节约铜和其他贵重金属，减少生产工序，提高生产率、降低成本；在电气电信方面，由于聚碳酸酯具有较高的击穿电压强度，因此可制作要求耐高击穿电压和高绝缘零件，如垫圈、垫片、套管、电容器等，以及 CD、VCD、DVD 光盘和计算机软件光盘的基材。由于聚碳酸酯具有良好的自熄性和高的透光率，因此在航空工业上获得广泛应用。

聚碳酸酯在包装上主要以薄膜形式用于蔬菜、肉类等需要呼吸氧气的食品。还可制成纯净水桶以及瓶、碗、盘类食品包装。

7. 聚砜（PSF）

聚砜具有许多优良的性能，最突出的方面是耐热性好，使用温度范围宽，可在 −100 ~ 150℃下长期使用，而且蠕变值极低。此外，它还具有良好的综合性能，是一种有发展前途的工程塑料。聚砜的分子结构式是：



由于聚合物结构中含有砜基（  ），所以称它为聚砜。同时，因聚合物主链是由芳香族苯环为主要成分组成的，结构中又带有醚键—O—，因此聚砜也可称为聚苯醚砜或聚芳砜。

聚砜具有优异的性能，特别是具有突出的耐热性、优良的抗蠕变性和良好的综合性能，这是由于聚砜具有比较特殊的分子结构，在它的主链上存在大量处于高度共轭状态的芳香族苯环，同时又有异丙撑、醚键和砜基。例如砜基，由于它的硫原子处于最高氧化状态，所以聚合物就具有抗氧化的特性。二苯砜基的高度共轭，使它的化合键比非共轭键的结构坚强有力，并能吸收大量的热辐射能，而不会使主链和支链断裂，使聚砜具有较好的热稳定性，并在高温条件下保持较高的硬度。异丙撑和醚键使聚砜坚硬而有较大的刚性、柔曲性、对热和水解的稳定性，以及易于熔融加工的特性。

聚砜与其他工程塑料的力学性能比较列于表 2-11。由表可知，在常温下它与几种常用工程塑料相比，其力学性能并不十分突出。但是聚砜有一个很可贵的特性，就是随着温度的升高，力学性能的变化比较缓慢。图 2-3 和图 2-4 是四种工程塑料的拉伸强度和拉伸弹性模量与温度的关系。

表 2-11　聚砜与其他工程塑料的力学性能比较

性能	聚砜	聚甲醛	聚碳酸酯	聚酰胺－66	ABS
相对伸长率（%） （在屈服时） （在破裂时）	 5～6 50～100	 15	 60～100	 25 300	 5.2 30
拉伸强度/MPa	71.5	70	60	60	60
拉伸弹性模量/MPa	2500	2700	2400	1800	2100～3200
抗冲击强度（悬臂梁式）/J	0.69	0.76	1.08～1.52	1.08	0.38～0.8
洛氏硬度 HRC	120	120	118	108	101～113
线胀系数/（10^{-5}/℃）	5.6	9.9	7.0	10～15	6～9

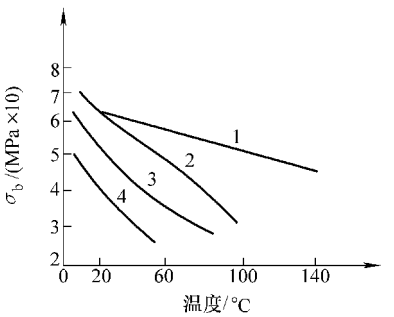


图 2-3　四种工程塑料拉伸强度与温度的关系
1—聚砜　2—聚甲醛　3—尼龙　4—ABS

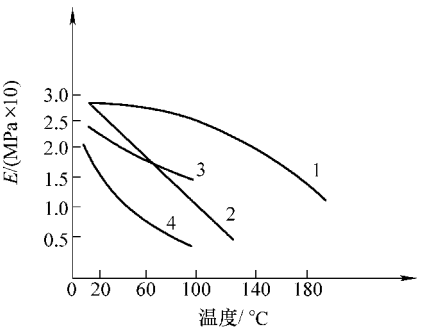


图 2-4　四种工程塑料拉伸弹性模量与温度的关系
1—聚砜　2—聚甲醛　3—ABS　4—尼龙－66

聚砜的另一个优异的性能是它的蠕变值很小，例如在 20℃，21MPa 的载荷下，10000h 后的蠕变值小于 0.1%，即使在 100℃，20MPa 的载荷下，一年的蠕变值也只有 2%。这一性能使聚砜很适于制造精密零件。

在聚砜的分子结构中，由于二苯砜基的高度共轭，使它具有很高的热稳定性。其热变形温度（在 1.856MPa）为 174℃。而在同种情况下，聚碳酸酯只有 132℃，聚甲醛只有 124℃。聚砜长期使用的最高温度可达 150℃，而聚碳酸酯只有 121～132℃，聚甲醛只有 85℃。聚砜不仅使用温度较高，而且脆化温度低，为－100℃，因此使用温度范围很广。

聚砜的化学稳定性好，对无机酸、碱溶液很稳定，对洗涤剂和烃油也是稳定的。但它的耐溶剂性能差，受某些极性有机溶剂，如酮类、卤代烃、芳香烃等的作用而腐蚀。

在机械工业中，聚砜用于制造精密齿轮、凸轮、真空泵叶片。它还用于制造各种仪表的壳体、罩，以及要求耐热或绝缘的仪表零件。

在汽车工业中，聚砜的应用越来越普遍。这是由于它的耐油性和耐热性好、力学性能高。现在汽车上的护板、分速器盖、仪表盘、风扇罩和某些衬垫、垫圈等都用聚砜制造。它还可以通过镀铬、镀铝做汽车车灯反射镜。

在电气和电子工业方面，由于聚砜高温时仍能保持优良的介电性能，因此也被广泛采用。例如用聚砜制造的电动机、各类电子仪器的积分电路板性能很好，还可以通过电镀金属制成印刷电路板和印刷线路薄膜。

聚砜还可以制成管材、板材与其他型材，用于各个方面。

8. 氟塑料

氟塑料是含有氟原子塑料的总称，其主要品种有：聚四氟乙烯、聚三氟氯乙烯和聚偏氟乙烯等。其中，以聚四氟乙烯为目前含氟塑料中综合性能最为突出的一种，它应用最广，产量最大，约占氟塑料总产量的 85% ~90%。氟塑料与其他塑料相比，具有优越的耐高低温、耐腐蚀、耐候性、电绝缘性能，不吸水以及低的摩擦因数等特性，其中尤以聚四氟乙烯最为突出。聚四氟乙烯的分子结构式为：

$$\text{—}[\text{CF}_2\text{—CF}_2]_n\text{—}$$

聚四氟乙烯是用氟石、三氯甲烷等为原料经加热裂解、聚合而成。它是一种结晶性的高聚物，密度 2.11 ~2.19g/cm^3，具有很高的化学稳定性、热稳定性以及电性能。

聚四氟乙烯的一个突出特点是具有优异的耐化学腐蚀性，它几乎不受任何化学药品、任何浓度的强酸（硫酸、盐酸、硝酸、王水）、强碱（氢氧化钠）和强氧化剂（重铬酸钾、高锰酸钾）的腐蚀，即使在高温下，对它也不发生任何作用。它的化学稳定性已超过了玻璃、陶瓷、搪瓷和不锈钢等，甚至还超过了贵金属（金和铂）。将黄金和聚四氟乙烯都放在氧化性极强的沸腾的王水中，结果黄金溶解了，而聚四氟乙烯却不起变化。所以，聚四氟乙烯有“塑料王”之称。卓越的化学稳定性使聚四氟乙烯成为一种性能很好的耐腐蚀材料。

聚四氟乙烯几乎不吸水。未经表面处理，它不粘附于任何物体上。它的摩擦因数极低，只有 0.04，是现有固体物质中最低的。聚四氟乙烯具有突出的耐高、低温性能，可在 -180 ~260℃的温度下长期使用，其力学性能几乎不发生变化。它的介电性能既与频率无关，也不随温度而改变。

聚四氟乙烯还具有自润滑性，其动、静摩擦因数几乎一样，是一种良好的减磨自润轴承材料。但也应指出，聚四氟乙烯的布氏硬度低，只有 30 ~40HBW，耐压强度不高，且具有冷流动性，故它仅宜于在低负荷（5MPa）下工作。综合起来，纯聚四氟乙烯的耐磨性并不十分满意。工程上常将它与其他树脂并用，取得了满意的效果。如前所述，用 5% 聚四氟乙烯填充的聚甲醛，其摩擦、磨损性能有显著改善。

聚四氟乙烯还具有无极性、不吸湿、耐热等特性。它在极潮湿的条件下仍能保持良好的电绝缘性，且不受频率和温度的影响，可用于高频电子仪器和电缆的绝缘，还可用作极潮湿的环境下工作的电器与无线电制品的绝缘层。

聚四氟乙烯在温度达到390℃时，开始分解，放出毒性气体，因此加工时必须严格控制温度。聚四氟乙烯的一个特点是加热后粘度极大，不能呈现流动状态。它加热到415℃也不会从高弹态转变为粘流态，加工性不好是它的最大缺点。虽然从结构上看它是热塑性塑料，但不能以一般注射、挤出等加工热塑性塑料的方法来成型，而只能采取类似粉末冶金时预压、烧结成型工艺。这样，加工生产率低、加工费用较高，并需一定的特殊设备。还应注意的是，在高温时它会分解出对人体有剧毒的气体，给成型和使用增加了困难。由于存在这些问题，限制了聚四氟乙烯更广泛的使用。

此外，聚四氟乙烯的机械强度、刚性和硬度都比其他塑料要差些。在载荷作用下，聚四氟乙烯塑料制品容易蠕变，有“冷流”现象发生。

聚三氟乙烯与聚四氟乙烯相比的最大优点是，加热时有一定的流动性，故可以用一般热塑性塑料的工艺成型。不过在成型时它对设备有腐蚀性，例如注射机的机筒、喷嘴、模具等，应采取特殊的耐腐蚀钢材。

聚三氟乙烯还具有良好的耐化学腐蚀性、耐热性以及电绝缘性能等，但比聚四氟乙烯要稍差一些。然而，其机械强度、硬度、耐磨性、抗蠕变性等均比聚四氟乙烯要好。

聚四氟乙烯主要用作减摩密封零件，化工机械中的各种耐腐蚀零部件以及高频或潮湿条件下的绝缘材料。例如，用多孔性聚四氟乙烯制的板材，可以作为任何强腐蚀介质的过滤器；用聚四氟乙烯乳液浸渍玻璃布制成的层压板，可以用作印刷电路的底板。

9. 氯化聚醚

氯化聚醚是1959年实现工业生产的工程塑料品种。其分子结构式为：

$$+CH_2-\underset{\displaystyle CH_2Cl}{\overset{\displaystyle CH_2Cl}{\overset{|}{\underset{|}{C}}}}-CH_2-O+_n$$

它是一种热塑性工程塑料，主链上含有醚键，相对分子质量为250000～350000，其中含氯量约占重量的46%。由于这种高聚物在其氯甲基相邻的碳原子上没有氢原子存在，不易脱去氯化氢，因而具有较好的化学稳定性，几乎能耐绝大部分任何浓度的酸、碱、盐和溶剂，只有浓硫酸、浓硝酸和极少数像环己酮那样的溶剂才能使它破坏。

氯化聚醚分子链上含有极性的氯甲基，本应属极性聚合物。但因其分子是对称的，故不显示极性，表现出较高的熔点和结晶性、极低的吸水和透气性。所以，即

使在温度交变和潮湿的情况下，仍然能保持良好的力学性能和电绝缘性能。

氯化聚醚以其独特的耐化学腐蚀性著称。耐蚀性仅次于聚四氟乙烯，但比聚四氟乙烯工艺性好、成本低。它具有一定的耐热性、良好的力学性能和介电性能。它正在代替有色金属和其他贵重金属制作机械零件、配件和仪表零件等。

氯化聚醚具有比较均衡的力学性能，除冲击强度较低外，其余各项性能均与常用工程塑料相差不多，拉伸强度和弹性模量随温度变化显著。

氯化聚醚制品在不太大的载荷条件下，可以在 120℃的温度下长期使用。但低温性能不很理想，在 -40℃时即呈现脆性。主要性能数据列于表 2-12。

表 2-12　氯化聚醚的力学性能和热性能

项　目	数值	项　目	数值
拉伸强度/MPa		洛氏硬度 R	100
-10℃	70	熔点/℃	178 ~ 182
23℃	42	软化点/℃	165
100℃	24.5	马丁耐热/℃	72
在潮湿环境下 100℃	21	热变形温度/℃	
拉伸弹性模量/MPa		0.46MPa	141
-10℃	5600	1.86MPa	99
23℃	1100	线胀系数/（$\times 10^{-5}$/℃）	
100℃	630	-35 ~ 0℃	9
伸长率（%）		0 ~ 23℃	12
-10℃	20	23 ~ 100℃	15
23℃	130	玻璃化温度/℃	7 ~ 32
100℃	200 ~ 250	燃烧性	自熄
冲击强度/J			
无缺口 23℃	>4		
-15℃	1.5		
有缺口 23℃	0.21		
-15℃	0.16		

氯化聚醚具有很小的吸水率，除聚四氟乙烯外，很少有工程塑料的吸水率低于它。在 23℃，24h 的吸水率小于 0.01%；即使在 100℃的水中煮一星期，也只增重 0.09%。这一特性，使氯化聚醚在潮湿环境中仍能保持其原有的形状和尺寸稳定性。

氯化聚醚具有很好的耐化学稳定性。这是由于氯化聚醚的结晶性及其分子结构高度稳定，其化学稳定性介于聚四氟乙烯和聚乙烯之间。

一般的有机溶剂如烃类、醇类、醚类、酮类和羧酸等在常温下均不能使氯化聚醚溶解或溶胀，即使在升温的情况下也不致使它有明显的破坏。各种矿物油，动、植物油脂在正常工作温度范围内不会使它发生任何永久性变形。只有几种强极性溶剂和芳香烃、氯代烃、乙二胺等在加热情况下才能使它溶解或溶胀。浓硫酸、浓硝酸、双氧水等强氧化剂在常温下可使氯化聚醚腐蚀。

由于氯化聚醚具有优良的耐化学腐蚀性，因此它在化学工业中的应用占有极其重要的地位。广泛用于制造各种贮槽容器，反应设备的衬里、管道、阀门、泵件、滤布、滤板及塑料涂层等。

用氯化聚醚喷涂的弯头在高于90℃的电解食盐水中工作三年无异常现象。

在机械方面，用氯化聚醚注射的204轴承保持架在9000r/min，1050N的径向载荷下，平均运转寿命为2150h，为轴承计算寿命的8倍，比原用的铜保持架的寿命提高一倍。氯化聚醚保持架甚至在18000r/min与24000r/min的条件下运转也获得成功。

压制和注射成型的氯化聚醚板材作机床导轨比原M级铸铁磨损量小很多。V型面磨损为铸铁的40%，平面磨损为铸铁的45%。用氯化聚醚制造的铣床螺母，使用结果比黄铜离心浇注的螺母耐磨，成本也比较低。

氯化聚醚的尺寸稳定性好，耐磨且成型收缩率小，故在仪器、仪表工业中常用于制造轴承、齿轮、齿条、蜗轮、轴套等。

10. 酚醛塑料

酚醛塑料是一种用途广泛、价格便宜的热固性通用塑料。

酚醛塑料有酚醛压塑粉制成的模压制品和酚醛层压塑料等品种。由酚类和醛类经过化学反应而得的树脂称为酚醛树脂。其中以苯酚与甲醛缩聚而成的酚醛树脂应用较为普遍。按制备条件不同，酚醛树脂有固态和液态两种。固态多用于生产压塑粉（俗称胶木粉）供模压成型用。液态多用于生产层压塑料，即由浸渍过酚醛树脂的片状填料（如纸、布、石棉或玻璃布）制成的各种塑料制品。

酚醛塑料加入填料品种不同，性能有很大差别，使用方面也不同，见表2-13。

表2-13　各种酚醛塑料的综合性能

品　　种	模塑料			层压塑料		
	木粉填充	碎布填充	矿粉填充	无填料	布	石棉
密度/(g/cm^3)	1.35～1.4	1.3～1.34	1.9～2.0	1.24～1.38	1.34～1.38	1.6～1.8
拉伸强度/MPa	35～56	35～56	21～56	49～140	56～140	42～84
弯曲强度/MPa	56～84	56～84	56～84	70～210	84～210	84～140
剪切强度/MPa	56～70	70～105	28～105	35～84	35～84	23～59
压缩强度/MPa	105～245	160～224	140～234	140～280	175～280	140～280
冲击强度/J	0.054～0.27	0.16～1.16	0.13～0.82	0.16～0.82	0.54～2.17	0.27～0.81
比热容/[cal/(g·℃)]	0.4	0.35	0.34	0.3	0.35	0.35

作为一般用途的酚醛塑料通常采用木屑粉作为填料，这是一种应用最早的塑料

品种。它具有一定的力学性能，抗拉强度为 39. 24MPa，表面硬度较大，耐热、不易变形，马丁耐热度在 110℃以上，故对于一般受力不大的制品来说已能令人满意了。由于这种塑料价格便宜、塑制方便，制品外观光滑美观，所以至今仍是一种应用很广的通用塑料。又因为它具有良好的电绝缘性，击穿电压在 10kV/mm 以上，一般要求电绝缘性能高的电器用具，如开关、灯头、插头、插座和仪表外壳等，还有仪表盒、表框、电器外壳、风扇座等，都可以用酚醛塑料来制造。市场上俗称为“电木”或“胶木”。但是，这种酚醛塑料制品有以下缺点：色调有限，只能制颜色深暗（黑色、棕褐色、深红、暗绿等）的物品，所以它不宜制作装饰件；其次，制品性脆易碎，抗冲击强度小，因此不能用来制造承受振动、冲击较大的机械零件。对于制得的制品，使用中也要防止重击或抛摔，免得损坏。此外，这种制品在潮湿空气中存放时，电绝缘性能要降低，还会失去光泽，有霉点以及产生裂纹。因为酚醛塑料中含有没有反应的游离苯酚，受热析出对人体会发生有害作用，因此，它不宜做食用器皿。

酚醛塑料还具有耐热、耐磨、耐腐蚀等优良性能。除可以用作各种电绝缘材料，还可以代替部分有色金属（如铝、紫铜、青铜等）制作零件，如汽车用制动片，化学工业用耐酸泵，纺织工业用无声齿轮等。

11. 泡沫塑料

几乎每种合成树脂都可以制成相应的泡沫塑料。目前最常见的有聚氨酯泡沫塑料（由甲苯二异氰酸酯与聚酯树脂或聚醚树脂加水、胺、催化剂和乳化剂反应而成）、聚苯乙烯泡沫塑料、聚氯乙烯泡沫塑料、酚醛泡沫塑料、聚烯烃泡沫塑料等几种。

泡沫塑料根据原料、配方和加工方法不同，分为软质和硬质两种。泡沫塑料中的气孔有的是互相连通的，叫做开孔型结构；有的是相互隔离的，叫做闭孔型结构。

泡沫塑料的主要特性是密度小，一般都小于 1，最低可到 0. 01，只及水相对密度的 1%。所以它可以漂浮在水面不沉没。它还有很好的吸音能力，能隔绝声音，并且不容易传热。同时它还保留了原来树脂的一些性能，如电绝缘性、耐热性、不燃性等，而且弹性也很好。像海绵那样软。它的弹性很大，伸长能力也能达到 5 ~ 6 倍，另一类硬质泡沫塑料，却非常结实和坚硬，很像木材，可以耐受相当的压力。正因为泡沫塑料有上述性能，所以在工农业生产中有广泛的应用。

泡沫塑料的应用除去日常生活用品外，在现代工业及尖端科学中也广泛使用。

在建筑、造船、冷藏、交通运输等和无线电技术中，泡沫塑料获得广泛应用。如用金属丝加强的聚苯乙烯泡沫塑料，可以制作屋顶、顶棚、楼房隔热层。用泡沫塑料做救生艇、救生衣、救生圈、渔网的浮子、与环氧树脂复合作船舶用的浮筒，以及在化工设备、冷藏车、火车车厢、电冰箱、贮水槽、广播电台、电话局、剧院等方面作隔热、隔音设备也很普遍。而软质泡沫塑料已大量地用作家具中的坐垫及

贵重精密仪器、疫苗和冷食品的包装材料。尿醛泡沫塑料还作为储存液体空气和液体氢的真空夹层填料，在填以这种填料的夹层中，真空度抽到 10^{-2} ~ 10^{-3} mmHg，它的保温效率就与一般真空度抽到 10^{-5} mmHg 时相同。

在造纸工业上，作为造纸的新材料，用挤出吹塑法制泡沫塑料薄膜创制了所谓“泡沫塑料纸”的新材料。相对密度为 0.08 左右（只有纸的六分之一到八分之一），耐酸、耐碱、耐油、无味、无臭、无毒，不吸水、不长霉、不遭虫蛀，绝缘、绝热性能都好，有弹性，所以有缓冲抗震作用。它可以同纸张一样压花印刷，但它的强度比同厚度的纸略低。这种塑料纸也可以与普通纸板复合或聚乙烯薄膜复合，制成各种包装纸或纸盒。

在泡沫塑料中可以种植植物，因此可以利用它来改造沙漠。砂土中有了一层泡沫塑料，雨水不易流失，并且能保存肥料。

把泡沫塑料作成直径比头发丝还要小的泡沫塑料微微球（就其相对密度来说，每立方米体积，球的重量还不到 20g）。在石油储器表面加上一层这样的泡沫塑料微微球，就可大大阻止它的挥发，损失可减少 50% ~90%。现在用泡沫塑料微微球制成的烟雾，不仅可以用在军事上，而且也可以充当农业杀虫剂和保护农作物免受低温的侵害。这种烟雾加以金属化后，还能反射微波，带在人造卫星和火箭上，作为它们的宇宙示踪剂。

2.4　塑料制品的生产工艺

热塑性塑料可反复加热熔融。其产品的生产过程是：加热至粘流态，模压成型，冷却固化后即成产品。常用的具体工艺方法如下：

1）挤出成型法——生产丝材、带材、板及薄膜等制品。

2）注射成型法——制造不连续制件，如齿轮等。

3）吹塑成型法——制取空心制品。

此外还有压延、真空成型、熔融抽丝、熔融喷涂等多种成型方法。

对于通过加热塑化、化学反应成型的热固性塑料，则主要采用在模具中加热、加压获得由化学反应形成交联的网状结构的制件。

除了模压成型方法以外，还可通过各种切削加工（如车、铣、刨、钻等）将塑料制成产品。

一般来说，热塑性塑料是以挤出成型、注射成型为主；热固性塑料是以模压成型、层压成型为主。现将几种最常用的成型方法介绍如下。

2.4.1　挤出成型

挤出成型是加工热塑性塑料最早的，也是目前产量最大的一种成型方法，其主要设备是挤出机。

挤出成型首先是将塑料连续地从加热机筒的后端加入，而后借助旋转螺杆的推力，使塑料边被加热边向机筒的前端移动，最后从喷嘴连续挤出。此外，还需一套必要的辅助装置，以起定型、冷却、牵引等作用。

挤出成型产品，变化众多，用途广泛。包括管、板、丝、膜、片、异型材等。如将挤出的管坯剪下来，趁热用瓣合模将它夹拢，然后用压缩空气吹胀。使之紧贴模具内壁，待冷却定型后，即为挤出－吹塑成型的瓶子、油桶等中空制品。如对挤出的管坯，趁热用压缩空气吹胀成膜管，冷却后折叠卷绕成管状薄膜，则为包装用的吹塑薄膜。此外，还可生产各种异型材，包覆电线以及用于树脂混合、色母料制造、粉末造粒等。

共挤出复合薄膜，这是采用几种塑料各自对挤出机供料。但从一个模口挤出而复合薄膜。这种复合薄膜具有综合性良好的性能，以满足包装时对薄膜材料的多种性能要求。

2.4.2　注射成型

注射成型具有对各种塑料加工适应性很强的特点，除氟塑料外，几乎所有热塑性塑料都可应用。同时，它还存在操作周期短、制品尺寸精确以及自动化程度高的优点，所以在工业上获得极为普遍的应用。注射成型是将颗粒状的塑料，置于加热机筒内，使物料熔化，然后用柱塞或旋转螺杆施加压力，使熔融物料经狭小喷嘴注入温度较低的闭合模具内，然后冷却、脱模，即可得到所需形状的制品。因为注射熔融物料的机械部分有柱塞和螺杆之分，所以注射机也相应分为柱塞式注射机和螺杆式注射机两大类。由于螺杆式注射机具有塑化效率高、塑料受热时间短、制品质量好的特点，所以一般在 $60cm^3$ 注射量以上的都用螺杆式注射机。

把塑料注射到带有活动型芯的模具内，这样使注射出的塑料围绕型芯形成试管形管坯，然后趁热将其移至吹塑模具里，再从型芯顶部吹入压缩空气，使试管形管坯吹胀到吹塑模具的内壁，所得制品为底部和颈部无拼缝线和厚薄均匀的中空制品。此种成型方法，为与挤出－吹塑成型相对应，所以称作注射－吹塑成型，用来制造我们常见的充气饮料瓶。

2.4.3　压制成型

压制成型，有模压成型和层压成型之分。

模压成型是塑料成型加工中最老的一种方法。它有点像粉末冶金，是将压塑粉置于加热密闭的模具内，然后通过压机，使塑料在规定的温度和压力下，经过一定时间成型、硬化。此方法尤其适宜于热固性塑料，如历史悠久的酚醛压塑粉模压电器零件，迄今仍在使用。

层压成型是将片状填料（布、纸或玻璃布等），经树脂液浸渍后，置于上下两面都是平整光滑的模板之中，然后通过压机，对之加热加压，待硬化成型后，即得

各种类型的层压板。

2.4.4 压延成型

压延成型是在连续成型中，不用模具的一种滚压加工的方法。它是用一系列热辊筒把塑料挤压延展成片或膜，其设备是压延机，而最常用的是三辊和四辊压延机。滚筒间隙距，决定片材的厚度；滚筒长度，则决定片材的宽度。压延成型所用塑料有聚氯乙烯、聚乙烯、聚乙烯醇、ABS 等，其中以聚氯乙烯为最常见。目前压延成型主要是用聚氯乙烯来制备片材、板材、薄膜以及各种类型的人造革等。

2.4.5 回转成型

回转成型是新型的加工方法。它是在瓣合式模具内放入塑料，然后让其在烘箱中作回转运动，以使塑料均匀分布于模具内壁，待塑料硬化成型后，即可脱模，取出制品，如模具做 360°回转运动，则可得中空制品；如做 180°回转运动，则可得车轮、齿轮、滑轮等制品。采用聚乙烯、尼龙等塑料作回转成型，则可制成硬质体；采用聚氯乙烯糊作回转成型，则可制成软质弹性体。回转成型，特别宜于加工大剖面制品，因为这种制品在挤压成型或注射成型时，会带来设备庞大、产品收缩等弊病。

2.4.6 浇铸成型

浇铸成型很像金属铸造，金属铸造是将已熔化的金属液体倒入一定形状的型腔模内，待金属冷却后，即得金属铸件；而塑料浇铸，它是将树脂液，置于一定型腔的模内，待树脂经过一番化学交联或加热后，使其硬化成型，即可脱模，取得制件。人们通常使用的材料有 MC—尼龙、环氧树脂等。应用这个方法，可浇铸各种形状的零件以及包封电器。如模具改为平面光滑的不锈钢带，则可浇铸成一层极薄的膜——流延薄膜。流延薄膜具有极高的清洁度，适宜于制造光学性能较高的薄膜。

2.4.7 真空成型和二次加工

真空成型是一种对热塑性塑料片材成型的方法。其工艺是将片材置于模具上面的夹具中，然后加热，使片材软化，再在模具底部抽真空，使软化的片材被吸向模壁，最后冷却定型。此方法加工制品的特点是薄壁敞口，且面积远远超过厚度，如包装盒、广告牌、行李箱、浴盆、汽车车体部件等，这是因为它不需要体积庞大、结构复杂的塑料注射机以及要求很高的模具。用于真空成型的材料有聚氯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯（有机玻璃）、尼龙、ABS 等。

还有一种相反的成型方法——压缩空气成型。压缩空气成型与真空成型的差别在于：在真空成型中，对片材的成型压力最理想也不会超过大气压；而压缩空气成

型时，其成型压力却可随意调节，不受限制，因而压缩空气成型就具有模型再现性好，生产效率高的特点。当然，这两种成型方法，其片材的加工温度都是在塑料软化温度之下，而这种成型加工温度的高低，只是用来调节对塑料片材起牵伸变形的作用。用片材作为原料，而后再成型加工，应是塑料的二次加工。当然，塑料的二次加工，除了这两种方法以外，热冲压、弯曲、粘合、焊接、喷镀、蒸镀、印花、抛光以及车、铣、钻、锯、磨、刨、切等机械加工，都是在塑料二次加工范围内。应当注意，对塑料片材成型加工时，都需要对片材加热软化；但如能不加热片材，在通常的室温下，即可直接成型，这就叫塑料的冷加工。塑料冷加工，就能使用金属加工的方法，如拉深、滚轧等，从而大大简化塑料成型加工的机械设备，大大提高劳动生产率。所以塑料冷加工是塑料固相成型的一种极其有发展前途的成型加工方法。

2.4.8　泡沫塑料成型

制造泡沫塑料的一个基本要求，就是要把气体均匀分散在树脂中。目前行之有效的方法，主要是下面几种：

1）在树脂的悬浮液或溶液中，通入空气，并进行强烈的机械搅拌，使树脂一面形成泡沫，一面固化定型。尿醛泡沫塑料即是用此法制造。

2）使惰性气体在压力下溶于树脂中，当压力降低时，气体逸出形成泡沫。开孔型的软聚氯乙烯泡沫塑料就是用这个原理进行连续化生产的。

3）把所谓“化学发泡剂”混入树脂中，成型加工时遇热分解而放出惰性气体，从而引起膨胀发泡。例如聚氯乙烯、环氧、聚烯烃、有机硅、酚醛等树脂，都借助于发泡剂而制成泡沫塑料。

4）使一种低沸点的有机物含在树脂中，树脂一旦受热，液体气化即膨胀发泡。某些牌号的聚苯乙烯、环氧及酚醛泡沫塑料，都是采用此法制造。

5）在单体形成高聚物的过程中，某些组分起化学反应而放出大量二氧化碳，在树脂生成的同时膨胀发泡。聚氨酯泡沫塑料的制造，基本上就是根据这个原理。

6）把许多中空的微小塑料圆球，或可膨胀发泡的树脂细粒，配入塑料组成中，塑料固化时，其中保留许多气孔。某种环氧泡沫塑料，即用此法制造。

另外，用挤出机进行连续发泡、用特制喷枪就地成型、现场发泡塑料等方法为泡沫塑料的生产应用开辟了一个十分广阔的天地。

最后应当指出，塑料成型加工是项专门的技术工作。在塑料成型加工时，对原料、设备、工艺这三者要正确处理。一般来讲，塑料品种的不同，其加工设备及工艺条件是不同的。但就是同一种成型加工方法，也会因其原料的不同，对其工艺条件做相应的改变。

塑料成型加工是塑料工业的一些重要组成部分。随着新型塑料品种的不断出现以及制品应用的要求不同，从而使塑料成型的加工获得了不少改进。如聚四氟乙

烯，由于在熔融状态下，没有良好的流动性，因而产生模压烧结成型、粉末挤压成型、液压成型等。又如，为了适应泡沫塑料制品的发展，也相继产生了挤出发泡、注射发泡以及压制发泡等新工艺。反之塑料成型加工的发展，也促进了塑料的应用，促进了塑料工业的发展。如粉末成型、长丝缠绕成型等方法，这对于制造大型制品十分有效。此外，在塑料成型加工中，采用先进的科学技术，如自动程序控制，激光切割与钻孔，微波加热以及应用电子计算机选择最佳的工艺条件等，这些都有利于提高塑料制品的产量与质量。

2.5 塑料的装饰

现在，很多塑料制品已逐渐替代了金属、玻璃、木材、纸、橡胶等制品。因此，对塑料制品的色彩装潢方面，也提出了越来越高的要求。随着人们生活水平的提高，对美的要求也越来越高了，人们不满意塑料的单调色彩，喜欢那些具有夺目光泽的金属，图案天成的皮革，纹路自然的木器。因此，用塑料制品模仿金属、木材、皮革等这种新颖的加工技术以及在塑料制品表面印上相应的图案等，统称为表面装饰。

表面装饰是一门涉及很多方面的综合性技术。它采用各种方法对塑料件进行加工，使制品得到要求的外观。

对塑料制品的装饰，首先需要颜料和染料进行着色。着色方法，一种是整体着色，即根据一定配方把塑料与颜料或染料等着色剂混合，经混合加热，从挤出机挤出后切粒，即制成了色彩鲜艳的塑料粒料。另一种着色方法是在已成型的塑料制品（或薄膜）上进行表面着色。本节主要介绍表面着色法，包括电镀、薄膜印刷、薄膜贴花等。

2.5.1 塑料电镀

塑料电镀制品，用途很广泛，如仿金属纽扣，家用电器的旋钮以至外壳等。由于塑料本身是不导电的，所以在塑料电镀前，必须经过特殊的表面处理，使塑料表面具有一定的微观粗糙和增强与金属离子结合的能力，以便与其后覆上的化学镀铜层或镍层牢固地结合。有了这种化学镀金属层，塑料就像金属那样具有导电性，可以随意镀上各种金属了。

塑料经电镀后，表面均匀，有金属感，可提高塑料的耐气候性和物理力学性能。塑料电镀多用于 ABS 塑料（丙烯腈—丁二烯—苯乙烯共聚物）的表面装饰。

在 ABS 塑料中，B（丁二烯）粒子的含量多少，对电镀镀层的质量影响较大，一般认为 B 粒子含量为 18% ~23% 的效果较好；含量太少或过多，在塑料受腐蚀时，其表面的 B 粒子被溶解下来，就会使表面所形成的凹痕太稀或太密，影响塑料与镀层之间的密着力。适合电镀的 ABS 塑料，在加工时不要加入颜料、填充料

等，以免影响镀层的牢度；回收的旧料（废旧塑料）也不能加进，以免影响镀层表面的均匀性。此外，模具内不能使用脱模润滑剂，制品的形状也不应有过深的凹陷、V 形沟或突出的尖角。

塑料电镀的镀液与金属电镀相仿，但塑料表面须经敏化、活化处理，以使它与金属镀层之间的结合紧密。

如要获得金色，可镀亮镍镀层并再镀上铜 – 锌合金或铜 – 锡 – 锌合金等仿金镀层，如果镀亮镍并套镀铬，则可得银白色全光亮产品。塑料上镀光亮锡 – 镍合金，所获得的产品，具有柔和的暗白色光泽，使人感到舒适。

有一种导电塑料，它是在塑料件注塑成型时加入导电物质而成的，由于它本身具有导电性，所以电镀前就不需进行活化、敏化之类的处理。

在电镀的基础上，发展形成的塑料真空镀膜（金属膜）技术更为突出。许多机器上的铭牌、刻度盘，嵌条、纽扣和各种旋钮、太阳灶的反光镜等，原来使用金属或电镀金属的，现在大多改用简便的真空镀膜技术了。特别是在塑料薄膜上镀金属层，真空镀膜技术更是具有举足轻重的地位。

2.5.2　真空镀铝

所谓真空镀铝，是在高真空条件下，使铝加热蒸发扩散，最后凝结于塑料薄膜的表面上，即成为金属铝覆盖层。

若以尼龙薄膜作为片基进行真空镀铝，再覆以金黄透明涂料，即制成烫金薄膜。将此薄膜覆于印刷品上，经过热压，就可在这些印刷品上烫上金字或图案。

真空镀不像一般电镀那样会产生废水、废气，造成污染，因此应用很广。

2.5.3　塑料烫印

在塑料人造革上烫金，在书籍封面上烫金，其工艺过程大致如下：先将涂有颜色的聚酯薄膜（即电化铝色箔）附在塑料制品的表面，然后用加有电热的烫印机头装上需要的图案标记钢模（或铜模）进行热压，温度一般在 120 ~ 160℃之间。烫印是目前单色装饰中比较简单易行的一种，它不需进行表面处理。如果要进行多套色，只要分次烫印即可。这种方法，一般应用于聚苯乙烯、ABS 等塑料制品（平面）。

烫金仅仅是利用烫印机将单色的金属箔转印到塑料制品表面而已，烫印还能将各种图画烫上去。特别是烫印木纹箔，许多塑料家具以及塑料墙板，表面木纹逼真，往往让人误以为是名贵木材制造的，其实就是烫印木纹箔的艺术效果。

塑料木纹烫印技术，是将油墨印刷在载体聚酯薄膜上成为木纹图案，然后借助于热压作用将油墨图案转移到塑料制品表面，最后掀去载体薄膜就成。这种烫印木纹工艺，是直接烫印转移木纹的，不像木纹装饰板那样使用时还须用胶粘剂把它粘贴上去，因此没有脱胶现象。加上塑料木纹烫印是在干燥状态下进行操作的，不需

使用溶剂，不需烘干，烫印后马上就可以装配发货，具有无污染、节能、高效、方便等优点。

2.5.4 塑料印刷

塑料印刷普遍采用凹版印刷。所谓凹版，是指印版上的图案花纹低凹于版面，沾上油墨后用刮墨刀将平面上多余的油墨刮除干净，只留下填充在凹部的油墨。印刷时，塑料薄膜被压印滚筒压在印版上，凹入部分的油墨即转印到塑料薄膜上去了。还可用凸版、胶版、平凹版等普通印刷方法直接进行印刷。

因为塑料薄膜本身的材料性能稳定，不易被油墨附着和粘牢，所以通常必须用电火花处理薄膜的表面，使其活化。

除了印制塑料薄膜之外，塑料印刷还广泛应用于其他塑料制品的印刷。

薄膜印花法目前主要应用于聚氯乙烯薄膜，如窗帘、台布等制品。对于聚乙烯、聚丙烯薄膜的印花，牢度稍微差些。

聚氯乙烯薄膜印花，常用的工艺有两种：一种是压延薄膜印花，另一种是一次连续压延薄膜印花。

压延薄膜印花即在压延薄膜成品上进行印花加工。先把成品开卷，再预热薄膜，除尘，然后像印染印花花布那样印上色浆，最后烘干、风冷即成。而一次连续压延薄膜印花，是在压延薄膜生产时连续进行的，它较一般的薄膜印花工艺理想，可省去开卷、预热、除尘等手续和设备，只要在原压延附机的冷却辊和检查台之间增加一些印花设备就行了，手续简化，节省劳力，质量稳定，成本降低。

2.5.5 薄膜贴花

薄膜贴花是目前聚乙烯、聚丙烯等塑料制品的一种装饰方法，是在塑料制品注射成型和吹塑成型的加工过程中进行的。其具体工艺过程如下：先将图案反印在薄膜上，然后待印有图案的薄膜贴在模具的内壁（用静电吸引或真空吸引将薄膜吸附在内壁），在注入塑料成型时，薄膜与制品即熔接在一起。由于薄膜贴花图案的印刷面被一层薄膜封闭在内，因此牢度较好，不会因溶剂、水和擦拭而脱落。

2.5.6 仿真人造革

该项技术是先用塑料覆在真皮上印出真实的花纹，成为塑料模。在塑料模上喷银浆，使其能导电。然后，采用氨基磺酸镍高速电镀液进行电铸（方法与电镀相似，只是镀层较厚），去掉塑料模子，取其金属镀层，就成为坚硬的电铸模了。它上面的花纹与塑料模一模一样。最后，在电铸模上镀上一层薄金，就成为压铸人造革的模具。

由于模具十分坚硬，花纹细致，加上镀金后不怕酸性腐蚀，所以压出的仿制品表面图纹清晰、光滑平整。最后，在此表面上喷上一层与动物皮革颜色一致的涂料

或珠光塑料，其外观就简直与真皮一样了。

2.5.7　塑料移印

许多塑料制品，在注射成型后都呈凹凸不平的表面。例如塑料玩具外壳，异型塑料制品等，为了使用上和装饰上的需要，要求标上说明文字或图案，一般的塑料印刷、烫印等工艺是无能为力的，因为它的表面凹凸不平，很难操作。

塑料移印技术，其特点就在于能在不规则形状的曲面上印出文字或图案来。被广泛应用于塑料制品、具有塑料表面的运动器材、文教用品、机电设备、钟表、照相机、计算机、家具、玩具等生产上。

塑料移印的原理与凹版印花相似。先在刻有文字图案的凹板上涂刷油墨，接着用刮刀将凹版表面多余的油墨刮掉（刻有文字的凹陷部分则填满油墨）。然后，用富有弹性且吸墨性能好的硅橡胶胶头打在凹版上，让构成文字的油墨转移到胶头上。最后，胶头打在塑料制品的表面，就成为文字或图案了。

2.5.8　塑料植绒

塑料植绒有静电植绒和喷涂植绒两种。静电植绒是先用橡胶型胶粘剂喷涂于塑料制品的表面，然后把它放入因为高压静电场的作用而悬浮着无数短纤维的空间中，使其表面均匀地粘上短纤维。而喷涂植绒，则是用特殊喷枪喷射出短纤维，使它插进预先涂有胶粘剂的塑料制品表面，牢固地粘在那里成为立绒。

2.6　橡胶

2.6.1　简介

橡胶也是一种高分子材料，其特征是在力的作用下，能产生很大变形，当变形力除去后能完全复原的能力，这种特征称为橡胶弹性，这是橡胶区别于其他材料的主要标志。同时，橡胶有优良的伸缩性和积储能量的能力，成为常用的弹性材料、密封材料、减振防振材料和传动材料，是一种不可缺少的工程材料。

橡胶的高弹性与其分子结构有密切关系，它属于线型结构。微观上看，橡胶是由许多细长而有很大柔顺性和流动性的分子链组成。通常它们卷曲呈线团状，并互相缠曲。受外力拉伸时，分子链就伸直；外力去除后，又恢复卷曲，这就是高弹性的来源。这种线型结构，主要存在于未硫化橡胶中。硫化，是在橡胶（生胶）中加入硫化剂和其他配合剂，使线型结构的橡胶分子间形成交联键，成为网状结构。这样，橡胶就具有既不溶解，也不熔融的性质，力学性能也有所提高，克服了橡胶因温度上升而变软发粘的缺点。因此，橡胶制品只有经硫化后才能使用。硫化后的橡胶也称橡皮。

橡胶还有良好的耐磨性、隔音性和阻尼性。橡胶的特性与配合剂的种类、硫化工艺等密切相关。

橡胶的应用很广，广泛用于建筑、运输、机电等领域，作为冲击与振动的隔离、噪声控制与结构阻尼、流体密封等方面起重要作用的结构部件。如机械制造中的密封件，减振、防振件，电气工业中的各种导线，电缆的绝缘。硅橡胶也可以作电机绝缘和电器、电子元件的整体包封材料等。橡胶的模压制品、橡胶带和热收缩管等在电气、电子工业中也广泛应用。

此外，还有耐辐射、防振、制动、导电、导磁等特性的橡胶制品。

2.6.2　生胶

1. 生胶的特点及分类

大部分橡胶是二烯类化合物的高聚体，平均相对分子质量高达 20 万以上。正因为其分子链很长，侧基较少，使橡胶分子柔性有余、刚性不足，温度稍低时硬而脆，温度稍高便发粘。为了赋予橡胶在工程中的实用性，必须添加硫化剂使分子某些部位产生交联，易于成型，另需加入其他配合剂，提高其物理力学性能，做成橡胶制品。未加配合剂、未经硫化的橡胶称生胶。在橡胶工业中也称胶料。

橡胶根据来源可分为天然橡胶和合成橡胶两大类。

2. 天然橡胶（NR）

（1）组成　天然橡胶来自热带植物茎叶流出的胶乳。产胶乳的植物有三叶树、杜仲树、马来树、银胶菊、橡胶草等。不同树种产胶的品质不同，其中以巴西三叶橡胶树的胶质最好。三叶树胶乳中含有橡胶烃的化学成分为顺式聚异戊二烯，分子式如下：

$$+CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\overset{|}{C}}=CH-CH_2+_n$$

n 约为 10000 左右，相对分子质量分布在 10 万～180 万之间，平均相对分子质量约为 70 万左右。实际上，天然橡胶是多种不同相对分子质量的聚异戊二烯的混合体。反式聚异戊二烯主要来自杜仲树和马来树，与三叶树胶乳所含橡胶烃为同分异物体。这两种树胶在常温呈硬固状态，具有塑料性质。当温度升高到 50℃以上时，能显示出橡胶弹性。

以常用的三叶树胶乳为例，其中含有橡胶烃 90% 以上，还含蛋白质、糖分、水分、灰分、脂肪酸等非橡胶成分。胶乳中每两个异戊二烯之间，98% 以 1，4 顺式联结。

（2）分类　从树上割取的新鲜胶乳固体物含量为 30%～40%，为避免胶乳过早凝聚，可加入少量氨水进行保护。天然胶乳需进行浓缩。浓缩后胶乳固含量提高到 60%～62%，或可供直接出售，或可进一步加工成干胶。

干胶的品种有标准胶（我国称颗粒胶）、烟胶片、皱胶片。

烟胶片是以鲜胶乳为原料，进行净化后，以醋酸与甲酸进行凝固，再经压片、熏烟等工序，制成表面有菱形花纹的棕黄色片状生橡胶。

皱胶片是以鲜胶乳为原料，经酸凝固后轧片，由空气干燥制成。其中色白、较净的为白皱片，用于制造浅色橡胶制品。含有杂质的颜色较深者为褐皱片，用于要求不高的橡胶制品。

颗粒胶是将鲜胶乳用酸凝固制成的胶片，通过机械切割或用胶乳经化学作用制成几毫米大小的胶粒，用空气快速干燥而得的固体粒状胶。

（3）性能　天然橡胶密度为 0.91 ~ 0.93。没有固定的熔点，加热到 130 ~ 140℃时软化，200℃时开始降解，270℃时迅速分解。常温时呈弹性，温度降到 0℃弹性下降，－70℃时呈硬脆性。

天然橡胶的弹性是所有橡胶中最好的，弹回率在 0 ~ 100℃范围内，可达 70% ~ 80%；在达到 130℃时仍能保证其正常的使用性能；当低于－70℃时才失去弹性。弹性模量小，是钢铁的 1/30000，最大伸长率可达 1000%。它的变形与作用力的关系可用图 2-5 表示。

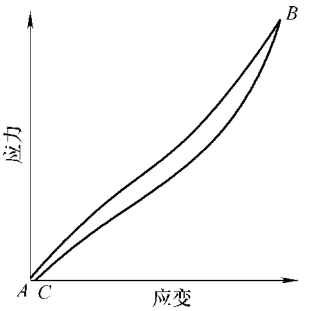


图 2-5　橡胶的变形与作用力的关系

橡胶在拉伸时，维持一定的形变所需要的力能随时间增加而减小的现象，称作应力松弛。当外力降到零时，橡胶试件不能恢复到原长，有残余应变，称为滞后，随时间延续，*AC* 段能逐渐缩短，甚至回到试件原来长度，这种性质称弹性后效。我们把橡胶的作用力及形变随时间变化的性质称作为橡胶的粘弹性。

图中 *ABC* 面积为伸长时外力做功与橡胶在复原时体系做功之差。可见橡胶在外力作用下发生形变时能吸收部分能量，称作滞后损失。利用这个性质，橡胶可用作吸声、隔音、减振、抗冲击材料。如果滞后损失以热能的形式储存在橡胶制品内部，则橡胶在拉伸、回弹过程中将造成局部升温，而温度上升对橡胶的弹性、使用寿命会有很大影响，应采取措施克服。各种材料的储能能力见表 2-14。

表 2-14　各种材料的储能能力

材料名称	储能/（J/kg）	材料名称	储能/（J/kg）
灰铸铁	1.11	增硬回火弹簧钢	284
极软钢	9.18	胡桃木	365
磷青铜	12.2	硫化橡胶	44800
轧制铝	22.6		

此外，天然橡胶具有较好的力学性能。天然橡胶经硫化处理后的拉伸强度为17～29MPa，用炭黑配合补强的硫化胶可提高到25～35MPa。

天然橡胶因含有不饱和双键，每一个双键形成一个活化点，分布在长链中，支配着橡胶的化学变化。可发生加成、取代、环化及裂解等反应，可变成硫化胶及其他多种橡胶的衍生物。

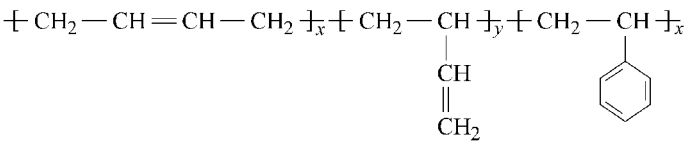
天然橡胶是非极性高分子化合物，因此电绝缘性好，体积电阻最高可达$10^{17}\Omega \cdot cm$。在潮湿或浸水后，体积电阻变化不大，介电常数则有所增加。

天然橡胶有较好的耐碱性能，但不耐浓强酸，在非极性溶剂中膨胀，故不耐油。根据相似相溶，通常易溶于汽油、苯、二硫化碳等溶剂中，相对分子质量大的生胶所得溶液粘度也大。

总之，天然橡胶的综合性能很好，缺点是耐油和耐溶剂性差，耐臭氧老化性较差，不耐高温，使用温度在－70～110℃范围内。广泛用于制造工业与民用橡胶制品。如轮胎、胶带、胶管、胶鞋、防震与缓冲支座，橡胶辊筒等。

3. 合成橡胶

（1）丁苯橡胶（SBR） 是整个合成橡胶中规模较大、产量较高、品种较多的通用橡胶。丁苯橡胶以丁二烯和苯乙烯为单体，在乳液或溶液中用催化剂进行催化共聚而成的浅黄褐色弹性体。其分子结构式为：



相对分子质量10万～150万之间，密度0.91。

按聚合温度不同，50℃时所得聚合物为高温丁苯橡胶，5℃时得到低温丁苯橡胶。低温聚合物相对分子质量分布较窄，使物理性能及加工性变好，所以现在高温丁苯橡胶已逐渐淘汰。

按丁二烯与苯乙烯用量比例不同，有不同品种：丁苯－10、丁苯－30、丁苯－50。后面的数字10、30、50表示苯乙烯的含量。苯乙烯含量越多，密度越大，主链上取代基苯环数量越多，由于苯环影响，增加了分子内碳碳单键旋转的空间障碍，使分子柔性降低，因此丁苯－50较丁苯－10的弹性和耐寒性差，但有较好的耐磨性、耐热性、耐老化性能。

丁苯橡胶分子结构规整性差，苯环使分子间距离变大，相对于天然橡胶来说，内聚力变小，缺乏结晶性，因而强度和伸长率较小，纯丁苯硫化胶伸长率为500%，抗张强度为1.96MPa，补强后的硫化胶抗张强度为16.7MPa，才达到天然橡胶未补强的水平。

分子链中苯环的存在，还使丁苯橡胶在变形过程中，需克服较大的分子内摩擦力而导致升温，所以弹性滞后损失较大。苯乙烯的加入，使丁苯橡胶主链不饱和程

度较天然橡胶低，耐氧气、热老化性能较天然橡胶有所提高。丁苯橡胶比天然橡胶质地均匀，价格低。它能和天然橡胶以任意比例混用。

丁苯橡胶为非极性橡胶，干燥时分子中无能导电的偶极子，电性能与天然橡胶相似，但受潮后电性能略有下降，其耐油性差。

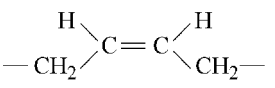
丁苯橡胶的缺点是生胶强度差（加入炭黑补强后与天然橡胶相仿），粘接性不好，成型困难，硫化速度慢，制成的轮胎使用时发热量大、弹性差。但丁苯橡胶与天然橡胶共混，可以相互取长补短，使丁苯橡胶获得广泛的应用。随着聚合方法的不断改进，现有许多特殊性能的丁苯橡胶，如充油丁苯，嵌段丁苯等。低温丁苯是世界上产量最大的合成橡胶之一。目前，丁苯橡胶普遍用于制造汽车轮胎，也用于制造胶带、胶管，在大多数场合下可以代替天然橡胶使用。通常丁苯 - 10 用于耐寒橡胶制品，丁苯 - 50 可看作自补强弹性体，用于制造胶辊等硬质橡胶制品。

近年来，橡胶硫化技术的改进，用电子束进行交联，可产生更多的—C—C—交联键，以减少硫黄的用量，生产出耐磨、耐臭氧、寿命更长的丁苯橡胶制品。

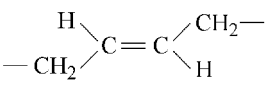
（2）顺丁橡胶（BR）　是顺式 - 1,4 聚丁二烯橡胶的简称。早在 1930 年用丁二烯做单体，用金属钠做催化剂，由人工合成的橡胶叫做丁钠橡胶。由于丁钠橡胶是一种无规立构，性能不够理想，因此丁钠橡胶一直未能得到发展。直到 1950 年出现了“齐格勒 - 钠塔”催化剂，合成了定向聚合物后，定向聚丁二烯引起了人们的注意，于是在 1958 年 ~ 1962 年合成橡胶工业中就发展了三个新型品种：顺式 - 聚丁二烯（简称顺丁）橡胶、乙丙橡胶和异戊二烯橡胶。顺丁橡胶以弹性好和耐磨而著称。就产量而言，目前仅次于丁苯橡胶跃居第二位。顺丁橡胶的性能接近于天然橡胶，此外，顺丁橡胶可加油和大量炭黑，与天然橡胶相比，提高了耐磨性，应用较广。顺丁橡胶的分子结构式如下：

$$-[-CH_2-CH=CH-CH_2-]_n-$$

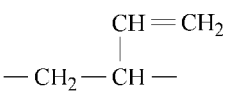
顺丁橡胶为一结构规整的均聚物。均聚物有三种异构体：



顺式 -1，4结合



反式 -1，4结合



1，2结合

顺式 - 1,4 聚丁二烯、反式 - 1,4 聚丁二烯、1,2 - 聚丁二烯，其中只有顺式 - 1,4 具有典型橡胶特性，按顺式 - 1,4 结构含量不同，可分为高顺式（含量 96% ~ 98%）、中顺式（85% ~95%）和低顺式（32% ~40%）三种，其中高顺式是主要生产品种。

顺式 - 1,4 聚丁二烯橡胶其分子结构与天然橡胶相比，其双键连接了两个 H 原子，而天然橡胶双键连接—CH_3 和 H 原子，所以顺丁橡胶分子内旋转的空间障碍比天然橡胶更小，分子柔顺性更高，耐低温性和弹性自然很好。回弹率大，滞后损失小，使动态生热小，挠屈性提高，耐疲劳性好，分子的高柔顺性带来的缺点是蠕

变性变大。

橡胶的耐寒性通常以玻璃化温度（T_g）来表示。顺丁橡胶 T_g 为 -105℃，天然橡胶 T_g 为 -73℃，丁苯橡胶 T_g 为 -60℃。由此可见，分子主链上侧基的大小对橡胶耐寒性的影响。此三种橡胶的某些性能比较可见表 2-15。

表 2-15　顺丁橡胶、天然橡胶、丁苯橡胶某些性能的比较

性能	玻璃化温度/℃	20℃时的性能					100℃下老化 96h 性能		
		抗张强度/MPa	相对伸长率（%）	永久变形率（%）	弹回率（%）	耐磨性（cm^3/kW·h）	抗张强度/MPa	相对伸长率（%）	永久变形率（%）
顺丁橡胶	-110	21.56～26.06	500～590	10～15	52	80	13.42	200	2
天然橡胶	-73	31.36	640	40	40	300	8.82	200	11
丁苯橡胶	-60～-75	27.44	650	25	30	260	0.78	310	11

注：除玻璃化温度数据外，其余指已加炭黑的硫化胶。

由于顺丁橡胶是结构规整高聚物，分子主链上侧基又小，所以分子间易整齐排列，有一定的结晶度，其橡胶表面有足够的硬度。制造轮胎时，它比丁苯橡胶的耐磨性高 26%。但它的硬度使胎面抗湿滑性不良。顺丁橡胶是非极性高聚物，与油类亲和性好，可制作充油橡胶。还可制其他橡胶制品，如三角胶带、橡胶弹簧、减振器、耐热胶管、电绝缘制品、鞋底等。

（3）氯丁橡胶（CR）　由 2-氯丁二烯-[1,3]以乳液聚合法得到的高聚物。其中反式结构含量为 88%～92%，分子结构式为：

$$+CH_2-\underset{\displaystyle Cl}{\underset{|}{C}}=CH-CH_2+_n$$

氯丁橡胶为浅黄或暗褐色弹性体，从分子结构可见氯丁橡胶与天然橡胶的差别是氯原子取代了甲基，氯丁橡胶分子链上挂有侧基 Cl，是极性基团，由于氯原子的存在，增强了分子间力，使氯丁橡胶成为极性分子而具有一定的耐油、耐溶剂、耐氧化、耐老化、耐酸、耐碱、耐热、耐挠曲和透气性好等性能，然而其电绝缘性因此变差。人们称氯丁橡胶为“万能橡胶”。

氯丁橡胶不易燃烧，一旦燃烧，便放出氯化氢气体阻止燃烧。这一特性是天然橡胶和其他合成橡胶所不具备的。

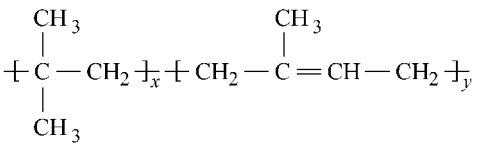
由于分子极性增加，低温时易结晶，T_g 提高，耐寒性较天然橡胶差，常温时性能较好，其抗张强度和伸长率与天然橡胶接近。由于氯原子电负性大，使双键的电子云密度略有下降，从而保护了双键，不易被氧化：在温度 22℃，臭氧浓度 1.7ppm，试样伸长 25% 的情况下，产生龟裂的时间，天然橡胶为 1.5h，丁苯橡胶为 1.3h，而氯丁橡胶需要 21h。

氯丁橡胶不仅在物理、力学性能方面可与天然橡胶相比拟，而且具有天然橡胶和一些通用橡胶所没有的优良性能。

氯丁橡胶的密度较大（为 1.25）。它的密度比最轻的乙丙橡胶要大 50%。制作相同体积的制品时，用量大、成本高。

氯丁橡胶是橡胶工业的重要原料。它的用途很广，主要利用其对大气和臭氧的稳定性好的特点制造电线和电线的包皮；利用耐油和耐化学稳定性制造输送油和腐蚀性物质的胶管；利用其高的机械强度制造使用寿命长的输送带；利用不燃烧特点制造地下采矿用橡胶制品，如运输带、胶管、电缆等。此外，还可用来制造各种垫圈、耐油的油罐衬里、粘结剂、轮胎胎侧、织物涂层、空气弹簧与各种橡胶弹簧，与天然橡胶配用可制作弹性车轮。

（4）丁基橡胶(IIR)　也称异丁橡胶，是异丁烯与少量异戊二烯的低温聚合物，黄色或无色无味的弹性体，密度为 0.92 左右。其结构式如下：



其中异戊二烯只占 2% ~5%，所以此橡胶不饱和程度低，约是天然橡胶的 1/50，具有耐热、耐臭氧、耐老化及不易硫化等特点。各种不饱和度丁基生胶的基本物理、力学性能列于表 2-16。

表 2-16　各种不饱和度丁基生胶的基本物理、力学性能

不饱和度（克分子%）	0.6	1.1 ~1.5	1.6 ~2.0	2.1 ~2.5	2.6 ~3.3
抗张强度（>）/MPa	17.6	17.15	16.7	15.7	15.19
伸长率（>）（%）	700	650	550	500	450
400% 定伸应力/MPa	4.41 ~6.17	6.17 ~7.74	7.74 ~9.41	9.41 ~10.98	10.98 ~11.76

注：试验配方为基胶 100、易混槽黑 50、氧化锌 5、硬脂酸 3、硫黄 2、促进剂 DM 0.5、促进剂 TMTD1，硫化条件：153℃ ×40min。

丁基橡胶分子链上含有较多的甲基，使分子内旋转受到较大的空间障碍，因此分子柔顺性很差，弹性较低，仅为天然橡胶的 1/4。

丁基橡胶的最大特点是有优异的不透气性，及耐极性溶剂，在醋酸、乙醇、酮、酯等极性溶剂中溶胀极小。几种橡胶气密性比较见表 2-17。

利用丁基橡胶的气密性，制造轮胎的内胎，探测气球、水袋、蒸汽软管等气密性要求高的橡胶制品。

（5）丁腈橡胶（NBR）　是丁二烯与丙烯腈的弹性共聚物，其结构式如下：

表 2-17　几种橡胶气密性比较[(cm^3/(cm^2 · 24h)]

气体 / 橡胶	空气	O_2	N_2	CO_2	H_2	气体 / 橡胶	空气	O_2	N_2	CO_2	H_2
NR	100	100	100	100	100	CR	30	17	24	25	27
SBR	65	73	60	72	84	IIR	13	6	11	14	15

$$+CH_2-CH=CH-CH_2-CH_2-\underset{\displaystyle CN}{\underset{|}{CH}}+_n$$

相对分子质量约 70 万，密度 0.96。

其中丁二烯为主要单体，丙烯腈为辅助单体，但是丙烯腈的含量对丁腈橡胶的性质有很大的影响。因此，丁腈橡胶常按丙烯腈的含量分类，通常分为五类：

1）最高，丙烯腈含量在 42% 以上。

2）高，丙烯腈含量为 36% ~41%。

3）中高，丙烯腈含量为 31% ~35%。

4）中，丙烯腈含量为 25% ~30%。

5）低，丙烯腈含量在 24% 以下。

丙烯腈含量越高，引入的—CN 基越多，分子极性越大，当丙烯腈含量高于 60% 时，甚至对芳香烃也有很好的耐膨胀性，但却失去弹性，丧失了橡胶的性能，变成硬质材料。丙烯腈含量低于 7%，在油中膨胀很大，失去了作为特种橡胶的基本性能。因此，丁腈橡胶中丙烯腈的含量一般在 15% ~50% 之间，既能耐油，又有弹性。但是其电绝缘性较差。其耐油性可见表 2-18。

丁腈橡胶的性能与丙烯腈的含量有很大的关系，其影响见表 2-19。

表 2-18　常用橡胶的耐油性能（体膨胀%）

品种 / 油类	天然胶	丁苯胶	丁腈胶	通用型氯丁胶
汽油	75 ~200	75 ~150	−5 ~10	10 ~40
煤油	60 ~150	60 ~125	−5 ~30	10 ~40
苯	175 ~450	175 ~450	75 ~125	100 ~400
丙酮	10 ~40	10 ~30	100 ~200	15 ~50
酒精	0 ~10	0 ~30	3 ~10	5 ~20
四氯化碳	200 ~500	115 ~450	25 ~40	100 ~200
润滑油	50 ~400	50 ~300	−15 ~10	0 ~150

表 2-19　丙烯腈含量对丁腈橡胶性能的影响

橡胶性能	丙烯腈含量由高－低	橡胶性能	丙烯腈含量由高－低
耐油性及耐溶剂性	由高→低	耐寒性	由差→好
耐化学腐蚀性	由高→低	弹性及屈挠性	由低→高
强力及定伸强力	由大→小	透气性	由小→大
耐磨性及硬度	由大→小	密度及导电性	由大→小
耐热性	由高→低		

由于分子的强极性，使分子内聚能变大，结晶度升高，玻璃化温度升高，低温性能变差。丙烯腈含量与玻璃化温度的关系见表 2-20。

丁腈橡胶中丙烯腈含量高的硬度也大，具有良好的耐磨性、粘结性和耐热性。选择适宜的配方，丁腈橡胶制品可在 120℃连续使用，在热油中能耐 150℃，在 191℃油中浸泡 70h，仍有屈挠性能，这是其他橡胶所不具备的。

表 2-20　丙烯腈含量与玻璃化温度的关系

丙烯腈含量（%）	玻璃化温度/℃
18	－45
26	－26
40	－22

丁腈橡胶耐水性随丙烯腈含量增加而提高，透气性随丙烯腈含量增加而减小。

常用丁腈橡胶丙烯腈含量为 15% ～50%，既有耐油性又有良好的弹性，它不溶于汽油、醚等有机溶剂，长时间浸泡也不发生溶胀。可制作各种耐油制品，如油箱衬里、油管密封等。

丁腈橡胶的其他主要性能如下：

1）耐油、耐溶剂性能十分突出，对一些有机溶剂也具有很好的抗腐蚀能力。在汽油、植物油、润滑油中不溶胀。此外，在天然气、环己烷、甲醇、乙醇、甲醛、乙醚中也不溶胀。虽然少数特种橡胶如聚硫橡胶、氟橡胶等耐油性能比丁腈橡胶好，但其他的特性不如丁腈橡胶，因此丁腈橡胶实际上是作为耐油橡胶使用的。

2）耐热、耐磨、耐老化、耐腐蚀性能也是比较好的，超过天然橡胶和许多通用橡胶。此外，还具有良好的抗水性。

3）耐寒性差，随丙烯腈含量的增加，耐寒性变坏，而耐油性提高。

4）耐酸性差，对硝酸、浓硫酸、次氯酸和氢氟酸等的抗蚀能力特别差，在三氯甲烷、二氯乙烷、氯苯、丙酮等溶剂中溶胀。

5）电绝缘性很差，不能制作电绝缘制品。相反，在某些情况下，它可作导电橡胶制品。配入乙炔炭黑等填料，可进一步提高导电性能。

6）强力和撕裂性能低，耐臭氧性差。

目前，丁腈橡胶主要用作耐油制品。丙烯腈含量高的丁腈橡胶，用于直接接触油类的密封垫圈、输油管、化工衬里、耐油运输带等；中等丙烯腈含量的丁腈橡胶，用于作各种油管、贮油箱、工业用胶辊、印刷胶辊及一般的模型制品；低丙烯

腈含量的丁腈橡胶用于制作低温耐油制品及耐油减振制品。

（6）乙丙橡胶（EPM） 是乙烯和丙烯的弹性共聚物。其结构式如下：

$$+CH_2-CH_2+_m+CH(CH_3)-CH_2+_n$$

相对分子质量 25 万左右，密度 0.85 ~ 0.87。

因为聚乙烯分子结构简单，又高度对称，使之易于整齐排列而结晶，在通常条件下聚乙烯呈塑料形态。而乙烯与丙烯在催化剂作用下以溶液聚合，可得到二元聚合物。因为丙烯的加入破坏了聚乙烯的高度对称结构，得到的二元聚合物成为线型长链分子，故具有了弹性体特征。

乙丙橡胶是橡胶中最轻的一种，分子中无不饱和双键，结构非常稳定，也称饱和橡胶。因此不怕热、不怕臭氧、耐龟裂性好，不易硫化，这是区别于其他橡胶的最大特点。

前面介绍的几种合成橡胶都含有不饱和双键。双键的存在，使橡胶在紫外光作用下，能吸收空气中的氧或臭氧而被氧化，发生氧化降解，橡胶的强度、弹性、硬度、伸长率等性能因此而逐步变坏，甚至丧失的过程称老化。导致老化的因素还有热、作用力、化学药品、湿度等，这些因素综合作用的结果，或可使橡胶过度交联而变硬变脆，或可使橡胶由于分子链的降解而变软变粘。

乙丙橡胶与其他通用合成橡胶相比，具有以下特点：

1）原料丰富、价廉易得。乙丙橡胶的主要原料是乙烯、丙烯，它们都是石油化学工业的最基础产品，直接用于生产橡胶是极为经济的。

2）乙丙橡胶可大量加油和填充炭黑，因而制品价格低廉。

3）乙丙橡胶具有优异的性能：

① 耐臭氧性能十分突出，在一定条件下，比其他通用橡胶高 100 倍以上。它在 100ppm 臭氧中可长达 2430h 不龟裂；160℃ 空气氧化 20 天仍有弹性；可在 150℃ 长期使用。而氯丁橡胶在 100ppm 臭氧中 46h 就发生龟裂。可见乙丙橡胶的耐臭氧、氧及热老化的性能极其优良。

② 耐老化（气候和阳光）性能优异，呈现很大的稳定性。160℃ 时乙丙绝缘橡皮热老化曲线见图 2-6。

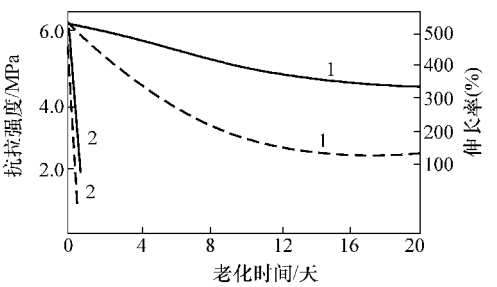


图 2-6　160℃ 时乙丙绝缘橡皮的热老化曲线

注：实线表示抗拉强度，虚线表示伸长率

③ 优异的电绝缘性。乙丙橡胶分子中无极性基团，电性能良好。尤其是浸水后电性能不变，长期交流击穿电压为 28 ~ 30kV/mm，比丁基橡胶高 50% 。

④ 使用温度范围宽，比天然橡胶使用温度要宽 66℃。

⑤ 对水、乙醇、丙酮等作用稳定。对硫酸、20% 次氯酸溶液和碱液等作用也很稳定，但不适用于浓硝酸。

此外，乙丙橡胶的回弹性、耐磨性和耐油性等和丁苯橡胶差不多。

乙丙橡胶虽然具有许多优点，但也有不少缺点。由于在分子中没有双键，致使硫化速度十分缓慢。硫化时需用过氧化物为硫化剂。此外，乙丙橡胶粘着性差，限制了它的应用。为解决乙丙橡胶的硫化问题，可在乙丙橡胶的分子链上引上二烯类化合物，使之成为三元丙橡胶。引入二烯后，分子链上不饱和键仍然不多，使三元乙丙橡胶（EPDM）仍保留有乙丙橡胶（EPM）的耐老化性、高绝缘性、易加工性等特点。三元乙丙橡胶的抗大气老化性能见表 2-21。

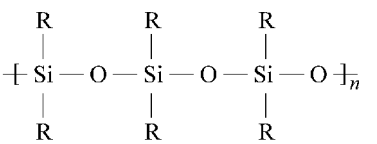
表 2-21　三元乙丙橡胶的抗大气老化性能

物理性能	老化前	自然老化		
		1 年后	2 年后	3 年后
硬度（邵氏 A）	63	69	69	70
抗张强度/MPa	19. 89	20. 58	21. 95	22. 64
伸长率（%）	560	490	440	410
表面状态		无龟裂	无龟裂	无龟裂

乙丙橡胶为非结晶性弹性体，因此抗张强度小，需用白炭黑（SiO_2）或炭黑进行补强，利用乙丙橡胶的耐热性及绝缘性，可用作 85 ~ 90℃级的绝缘与高压绝缘制品和室外耐大气老化的橡套材料。

乙丙橡胶还用于制蒸汽胶管、胶带、耐热运输带、密封圈、散热软管、高低压电线绝缘，也常与其他橡胶并用，以提高其他橡胶的耐老化、耐臭氧性能。

（7）硅橡胶（SI）　是由硅氧烷聚合得到的线型分子所组成。属于元素有机高分子化合物，为特种合成橡胶之一。硅橡胶的结构与大多数橡胶不同，它不是由碳原子构成分子主链，而是由硅和氧原子构成分子主链。分子主链上没有一个碳原子，其分子结构式为：

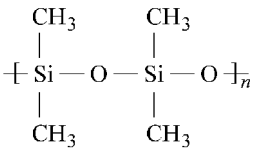


式中 R 为有机基团，可以是相同的，也可以是不同的；可以是烃基，也可以是含有其他元素的基团。硅橡胶分子内无不饱和键，也是饱和橡胶，有优异的耐气候性与耐臭氧性。硅橡胶具有独特的耐高温与耐低温性能，有相当宽的使用温度范围，一般为 -100 ~ 300℃。

硅橡胶作为特种橡胶其独特的性能是能耐高温和低温。（—Si—O—）是柔性链，易于内旋转，玻璃化温度 T_g = -120℃，故在低温下具有较好的弹性。又由于硅氧键（Si—O）的键能较高，为 451. 9kJ/mol，因此硅橡胶具有很高的热稳定性。

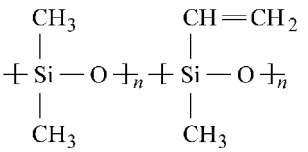
不同的侧链基（R）使硅橡胶呈现出不同的性能，因此硅橡胶的品种很多，并且以侧链基的种类分类。

最早的硅橡胶品种是二甲基硅橡胶，侧链基（R）全部由甲基组成。结构如下：



由于甲基处于饱和状态，使硫化速度缓慢、过程复杂，必须用活性过氧化物硫化，性能也不理想，因此逐渐被其他种类的硅橡胶替代。

目前用量最大的是甲基乙烯基硅橡胶，其侧链基除甲基以外，还有不饱和的乙烯基。结构如下：



这种硅橡胶由于侧链含有不饱和的乙烯基，能用硫黄硫化和白炭黑作填充剂，可制作厚制品。加工性能好、硫化速度快，能与其他橡胶并用。使用温度范围 -70 ~300℃，还具有耐辐射和介质损耗小的性能。

此外，还有甲基苯基硅橡胶、甲基苯基乙烯基硅橡胶、硅氟橡胶和腈基硅橡胶等。这几种硅橡胶各具有某一方面的特殊性能。

硅橡胶主链上 Si—O 键有极性，但分子结构规整对称，使其具有非极性橡胶特性。它的结晶度小、内聚力小，所以抗张强度小，约 1 ~1. 5MPa，伸长率为50% ~80%，抗撕裂强度小，必须补强。多用于耐高温绝缘材料及模型制品垫片、模片等。由于硅橡胶还具有优良的耐热性和抗寒性，具有良好的耐候性、耐臭氧性和优良的电绝缘性，因此硅橡胶主要用于制造各种耐高低温的橡胶制品。例如各种管道系统的接头，在高温使用的各种垫圈、衬垫、密封件，各种耐高温电线、电缆的绝缘层等。

硅橡胶还具有很好的生理特性，应用于生理功能结构材料。如整容以及人工器官等的材料。

（8）氟橡胶　是以碳原子构成主链，含有氟的高分子弹性体。氟橡胶作为特种橡胶最突出的性能是耐腐蚀。其耐酸碱及耐强氧化剂腐蚀的能力，在各类橡胶中是最好的。其耐热性也接近硅橡胶，是国防和尖端技术中的重要材料。

氟橡胶的应用范围较为广泛。但由于其价格昂贵，耐寒性差、加工性能不好，因此，目前仅限于某些特殊用途。

以上介绍了合成橡胶主要品种的物理特性，各品种的性能比较，见表 2-22。

表 2-22 合成橡胶主要品种的性能比较

		天然橡胶	丁苯橡胶	丁腈橡胶	氯丁橡胶	顺丁橡胶	丁基橡胶	乙丙橡胶	异戊橡胶
物理性能	密度	0.93	0.94	1.00	0.25	0.91	0.90	0.85	0.92
	门尼（ML）值	—	185.4～272.1	293～376.8	—	167.5～230.3	167.5～209.3	—	230.3～272.1
	导热性/[(kJ/m·h·℃)]	0.12	0.21	0.21	0.16	—	0.078	—	—
	导热系数/（$1℃\times10^{-5}$）	66.6	66.6	70.2	59.2	—	57.6	—	—
	电绝缘性	好	好	差	很好	很好	优异	很好	良好
力学性能	抗张强度/MPa	29.40～34.30	24.50～30.38	24.50～29.40	26.46～31.36	17.15～24.5	17.15～20.58	24.50～29.40	24.50～29.40
	300%定伸/MPa	10.78～11.76	8.40～11.76	—	—	8.82～11.767	6.86～8.82	8.82～10.78	8.82～10.78
	相对伸长（%）	600～850	600～700	450～700	500～650	450～550	650～850	450～550	600～800
	弹回率（20℃）（%）	70～72	40～45	25～34	65～70	75～78	20～27	40～45	66～89
	抗撕裂性	优异	差	好	可以	差	好	好	很好
	耐磨性	很好	优异	很好	很好	优异	好	很好	很好
耐热性能	玻璃化温度/℃	-73	-60～-75	-32～-55	-40～-50	-110	-67～-69	-59	-70
	适用温度范围/℃	-51～80	-51～82	-17～121	-40～115	-85～80	-17～98	-20～89	-50～80
耐老化性能	耐光	可以	可以	可以	优异	可以	优异	优异	可以
	耐臭氧	差	差	差	很好	可以	很好	优异	差
	耐候	好	好	好	优异	可以	优异	优异	好
	耐燃	很差	很差	很差	优异	很差	很差	很差	很差
	耐热	差	可以	好	很好	很好	好	很好	好
耐药品性能	水	好	很好	很好	很好	好	很好	很好	好
	酸	好	好	好	很好	好	很好	优异	好
	碱	很好	很好	好	很好	好	优异	优异	很好
耐溶剂性能	脂肪族	差	差	优异	很好	差	可以	差	差
	芳香族	很差	很差	好	差	很差	可以	很差	很差
	合氯溶剂	很差	很差	可以	很差	很差	差	很差	很差

2.7 橡胶配合剂

生胶是橡胶制品的主要成分。但生胶有的弹性很大，有的弹性较小而粘，缺乏良好的加工性能，也不能满足橡胶制品的使用要求，为生产工艺上的需要，同时有利于降低成本。在橡胶制品的制作过程中，需添加各种配合剂。现用的配合剂已达几千种之多。

根据配合剂在橡胶中所起的作用不同，分别给予不同的名称。橡胶配合剂有硫化剂（交联剂）、促进剂、活性剂、防老剂、增塑剂（软化剂）、补强剂、填充剂、着色剂等，此外还有特殊用途的配合剂，如阻燃剂、防霉剂等。每一种配合剂在不同橡胶中起不同作用，有时在同一橡胶中又可同时起几种作用。例如炭黑既是补强剂，又是填充剂，同时又是光吸收剂，以防光老化作用。作为橡胶配合剂，必须不含对橡胶不利的杂质，要求有足够的纯度，杂质如水、酸、盐、挥发物等的掺入，可影响橡胶制品的性能及各种质量指标，甚至影响其化学性能。要求配合剂有足够的细度，与橡胶有很好的相容性，能充分润湿，并易于分散均匀，有利于混炼操作。对绝缘橡胶制品，则要求配合剂本身要有一定的绝缘性，此外，配合剂大多是粉状，要求无毒、污染小。以保证生产环境卫生及操作人员安全，除此还要考虑其价格低廉、来源广。

2.8 橡胶生产工艺

2.8.1 塑炼和混炼

各种不同组成、结构的生橡胶，有一个共同的特点，均为相对分子质量很高的线型高聚物，具有很高的柔顺性和很大的弹性。其粘弹性受气温影响显著，缺乏良好的加工性能和使用性能。为便于加工，必须首先对生胶进行塑炼。橡胶的塑炼是利用较高温度下氧的作用，或在较低温度下的机械作用，使部分橡胶长分子链被切断，相对分子质量分布趋于均匀。降低弹性，从而提高橡胶塑性的工艺过程。天然橡胶通常用机械塑炼法，在炼胶机上进行。炼胶机由两个反向转动而转速不同的空心滚筒构成。切好的橡胶碎片在炼胶机的两个滚筒之间受到扯裂、摩擦和挤压，并同时受空气氧的作用，橡胶分子发生裂解，因而塑性急剧增加。在塑炼中变软的橡胶紧贴在转速慢的那个滚筒上，形成橡胶片。塑炼的温度和时间，依橡胶品种而定，天然橡胶为 40℃，15 ~ 20min。

橡胶的可塑性可由门尼粘度判断，通常适宜加配合剂进行混炼的橡胶，门尼粘度在 60 左右。

门尼粘度可由下列方法测定。将橡胶试样放在试验机扁平圆形模腔内，腔内有可旋转的圆盘。试样在（100 ± 1）℃预热 1min，转动圆盘 4min，试样塑性不同，给圆盘扭力不同，扭力大小可由仪表表示，其读数即为门尼粘度。用 M_{1+4}100℃表示。不同生胶的初始门尼粘度值见表 2-23。

通常门尼粘度数值越大，表示该橡胶相对分子质量越大，可塑性越小；门尼粘度小，表示相对分子质量小，可塑性大。门尼粘度只能用来比较相对分子质量大小，不能测定相对分子质量具体数值。具体见表 2-24。

表 2-23　几种生胶的初始门尼粘度

胶种	M_{1+4}100℃	胶种	M_{1+4}100℃
天然橡胶	95 ~ 120	丁腈 - 26	95
异戊橡胶	55 ~ 90	丁腈 - 40	90
丁腈 - 18	120	顺丁橡胶	45 ~ 55

表 2-24　丁基橡胶门尼粘度与相对分子质量

M_{1+4}100℃	45	751
平均相对分子质量	32 万 5 千	60 万

经塑炼的生胶，还需根据所用生胶品种的特性及橡胶制品的使用要求，按一定重量比例配加各种配合剂。据粗略统计，平均每 100 份（重量比）橡胶要配用硫化剂 2. 5 ~ 3. 0 份，促进剂 1. 5 ~ 2. 0 份，活性剂 8 ~ 10 份，补强剂 25 ~ 40 份，填充剂 40 ~ 45 份，增塑剂 10 份，防老剂 2 ~ 2. 5 份。这种不同重量比的橡胶与配合剂的用量叫配方。根据不同的配方可制出各种不同性质的胶料。混炼除了要严格控制温度和时间外，还要注意加料顺序。正确的加料顺序应是：塑炼胶、防老剂、填充剂、增塑剂，最后是硫化剂和硫化促进剂。配合剂在混炼过程中均匀分散于生胶基体中，以改善橡胶的耐热性、化学稳定性、流变性、电性能等主要品质。混炼胶是橡胶制品的主要原料，也叫胶料。不同橡胶的加工性能不同，可参见表 2-25。

表 2-25　各种橡胶加工性的比较

品种 / 项目	NR	SBR	IIR	CR	NBR	聚硫橡胶
混炼效率	作为 100	85	90	100	50	75
挤出性	作为 100	90	90	75	50	75
压延加工性	作为 100	90	100	90	50	50
成型性	优	可	良	良	可→良	良

2.8.2 成型硫化

胶料可直接成型硫化，生成制品叫橡皮，这是最简单的橡胶制品。大多数胶料还需加骨架材料。骨架材料用来增加橡胶制品的抗拉强度、抗冲击强度、抗撕裂强度、耐磨耗等力学性能，同时限制其变形性。

橡胶制品的骨架材料为各种纤维织成的布、线绳、针织品，其中布类用量最大。骨架材料的分类，实际就是纤维的分类。按其材质分类如下：金属纤维（钢丝等）；无机纤维（玻璃纤维）；矿物纤维（石棉）；植物纤维（棉、麻）；动物纤维（羊毛等）；化学纤维（醋酸纤维）；合成纤维（锦纶、涤纶、氯纶、丙纶、腈纶、维纶）等。

各种有机人造纤维、棉纤维、麻纤维及玻璃纤维以线绳、帘线、帘布、帆布的形式作为橡胶的骨架材料，钢丝也以帘线与绳的形式作为骨架材料用于橡胶制品中。骨架材料在橡胶制品中的用量，视不同制品而定，如轮胎中用量为 10% ~ 15%，运输带中约 65%，雨衣、胶布中就更多，多达 85%。

骨架材料用的各种纤维织成的布称帘布，这些骨架材料用于橡胶制品时要进行挂胶处理，以利于与内外胶层结合。

有了胶料与骨架材料，还要通过一定的工艺才能加工成橡胶制品。把混炼好的胶制成一定厚度、宽度或各种断面形状的胶片，或在骨架材料上擦胶或贴胶，完成这种工艺的过程称压延，得到板材、片材。

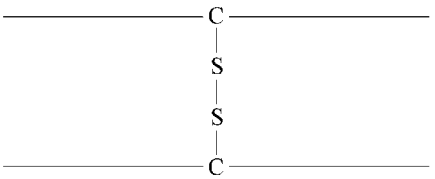
经压延的胶片，发现其纵向和横向的力学性能不同，表现在胶片纵向扯断力比横向大，而伸长率则相反，即纵向比横向小，这种纵横向所产生的性能差异，称压延效应。压延效应对橡胶制品的性能有不利影响，应设法消除。

胶料也可通过螺杆挤出机进行挤出，这个工艺过程，可使橡胶制品生产过程具有连续性及具有制造任何形状制品的可能性。挤出工艺应用范围很广，只要改变挤出机的口模，就可以制得如轮胎胎面、内胎、胶管、电线、棒、管以及各种型材等产品。

这些成品最后还要送到硫化罐内进行加热，加压硫化。

橡胶硫化的目的在于使橡胶具有足够的强度、耐久性以及抗剪切和其他变形能力，减小橡胶的蠕变性。硫化反应在橡胶的成型工艺过程中，是一种最重要的过程。硫化是一种通过形成某种交联键的化学反应。交联的类型和长度，交联的数目（交联密度）以及交联点之间的距离有无规则等都对硫化胶的性能有明显的影响。

通常的不饱和橡胶，例如天然橡胶、丁二烯橡胶用硫来硫化时，形成二硫交联（硫化在双键上进行）：



经这样硫化的橡胶成为一个交联的高分子网状结构，如图 2-7 所示。图中的●表示化学交联点，两个化学交联点之间的那段分子链称为网链。当硫化程度较低时，在高分子网状结构中，化学交联点就比较稀，而网链比较长，每一段网链中，可以包含许多个链段。这些链段的热运动结果使网链强烈地蜷曲起来。在拉伸橡皮时，链段除了作热运动外，还要在外力的作用下作一些定向运动，使分子链沿外力的方向伸展开来。表现在宏观上就是橡皮拉长好几倍。去外力后，链段的热运动又要使网链强烈地蜷曲起来。表现在宏观上就是被拉长了的橡皮要弹回来，恢复原状。在整个过程中，大分子链之间并没有产生相对滑移，就是说，大分子链蜷曲情况的改变，不但可以给整块材料提供很大的形变，而且它所提供的是一种弹性形变。这就是现今大量的天然和合成橡胶在使用前需经过硫化的根本原因。

如果在大分子网状结构中，化学交联点的密度较高，网链较短，在某一段网链中所包含的链段数目很少，那么这种材料的高弹形变就很小，硫化程度较高的橡皮就属于这种情形。如果化学交联很密，网链甚至比链段还短，这种材料不但不能发生高弹形变，而且还很脆，酚醛塑料就属于这种情况。

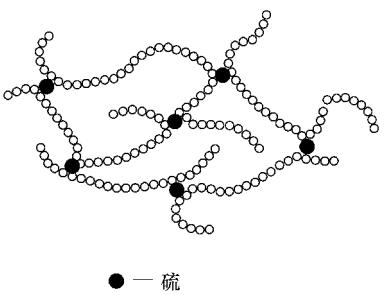


图 2-7　硫化交联的橡胶结构示意图

如果交联程度很低，网状结构不完善，那么在拉伸过程中，除了有高弹形变发生外，还会有塑性形变发生（分子发生滑移）。这从材料内部来看，就是不但链段的运动使分子链的蜷曲情况发生改变，而且还会使分子链之间发生相对滑移，这当然是不希望的。由此可见，除橡胶的分子结构对性能有重要影响外，硫化过程与橡胶的性能也密切相关。

经过硫化后最终便得到橡胶制品。

2.9　橡胶的主要技术性能与应用

2.9.1　主要技术性能

橡胶在成型加工、储存、使用过程中，性能逐渐下降。在光与热的作用、机械应力（拉伸、压缩、曲挠、扭力等）作用、电场交替变化作用、介质（油、水或

酸、碱等）作用以及微生物作用下，橡胶在外观上出现变暗、变色、斑点（发生霉变）甚至有裂纹；在物理化学性能上，溶解度发生变化，玻璃化温度升高变脆，流变性变大而发粘，耐热性、耐寒性变差；力学性能方面，同样产生不同程度的变化，如硬度、抗张强度、伸长率、抗曲挠性等下降；电性能方面，绝缘电阻下降，击穿电压变小等，各方面性能明显变劣，使橡胶失去使用价值。

使用性能的好坏，可用力学性能变化来表述，还可用老化系数、疲劳强度、抗撕裂强度及耐磨性来表示。

1. 力学性能

橡胶的力学性能是指橡胶在外力作用下，抵抗破坏及变形（弹性变形与塑性变形）的能力。常用的有抗拉强度、定伸强度、断裂伸长率、抗撕裂强度等。

橡胶的抗拉强度、伸长率可用拉伸法测定。拉伸试验方法是给试样施加静态拉伸负荷，以等速拉伸至试样断裂。拉伸过程中，随试样伸长，拉伸力不断变化，把拉伸力（应力）与伸长（应变）作图可得应力—应变曲线，当试样断裂时，对应的应力称强度极限以 R_m 表示，即为抗拉强度（也叫抗张强度）。抗拉强度 R_m 指橡胶受拉力作用发生断裂时，单位断面积上所受最大应力（负荷）。可按下式计算：

$$R_m = \frac{p}{b \times t} \times 9.8 \times 10^{-2}$$

式中 p——最大负荷（N）；

t——试样厚（cm）；

b——试样宽（cm）。

橡胶被拉断时，伸长的长度与原有长度的百分比称为断裂伸长率，记作 ε，也叫相对伸长率或伸长率。

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_0——试样原有长度；

L——试样被拉断时的长度。

有时橡胶试件不宜被破坏，常用定伸强度来表示材料的强度值。它表示橡胶被拉伸到一定长度时（200%、300%、500%、700%）单位面积所需负荷量。

橡胶制品使用时因机械损伤出现裂口，在外力作用下，裂口处易产生撕裂，测试时，在胶料试样上先割一小口，在抗张试验机上拉伸至断裂，记下所需要的负荷。该试样的抗撕裂强度可用下式计算：

$$B = \frac{P}{t}$$

式中 B——抗撕裂强度（N/cm）；

P——断裂负荷（N）；

t——试件断裂处厚度（cm）。

2. 耐老化性能

橡胶的耐老化性可由老化系数表示。测定方法有热空气老化、臭氧老化、气候老化等试验。最常用的是热空气老化试验。将试件在常压和规定温度（70℃ ±1℃或 100℃ ±1℃），用热空气作用 24h、48h、72h、144h，测定其抗拉强度与伸长率的变化。用老化系数 K 表示：

$$K = \frac{c'}{c_0}$$

$$c = \sigma_b \times \varepsilon$$

式中　c'——老化后抗张积；

c_0——老化前抗张积；

c——抗张积。

3. 耐疲劳性能

橡胶的耐疲劳性能可由耐屈挠疲劳与耐压缩疲劳表示。

屈挠疲劳表示胶料在屈挠试验机上，经反复多次（可达几万到几十万次）屈挠后试件的断裂情况。我国的屈挠断裂性能分为六级，级数越高，越近断裂。

压缩疲劳是以橡胶试件经多次压缩后，橡胶的永久变形大小与生热程度来表示的。

4. 磨耗

磨耗是橡胶制品使用过程中常见的破坏现象。耐磨耗性以磨耗减量来表示。实验室测定常用阿克隆磨耗试验法，即将试样在一定压力下，与砂轮成一定倾斜角，进行相对滚动摩擦，测定在规定的行程（1.61km）磨耗后，试样的重量变化。磨耗量（g）由下式来计算：

$$g = \frac{g_0 - g'}{d}$$

式中　g_0——磨耗前重；

g'——磨耗后重；

d——橡胶的密度。

2.9.2　应用

橡胶品种多，根据实际使用条件和技术要求，以及不同橡胶的性能特点，对不同橡胶制品，可选用适当的橡胶品种，所选橡胶品种通过加入不同品种和用量的配合剂及硫化等工艺条件，对其品质进行优化调节；也可选不同橡胶配合使用，以扬长补短；或进行合理设计橡胶制品的结构，使橡胶充分发挥其优良特性，满足制品的使用要求。

橡胶的应用非常广泛，在建筑工业中，用作桥梁支座、建筑物地下防震基础、

隔音吸声材料；在交通运输业中，有大量使用与消耗的轮胎、弹性车轮、各种空气弹簧及缓冲器、铁路轨枕垫等；在机电工业中，做成各种冲击与振动隔离的支座、密封垫片、还有大量绝缘材料，各种输气、输油、输液的胶管，各种用途的输送带与传动带。在民用方面，有各种胶布、雨鞋等。

以汽车轮胎为例，轮胎由外胎、内胎、垫带组成，其产量在橡胶制品中最大，用胶量最多，占橡胶制品生胶消耗总量一半以上。根据轮胎使用情况，轮胎结构中每一部分在行驶中起不同作用，受到的作用力也不相同，有压应力、摩擦力，冲击力、屈挠力等。由于使用条件不同，对各部分胶料性能要求也有所侧重，对胎面胶胶料，因它直接与地面接触摩擦，为使轮胎在运行中具有高牵引力、耐刺伤，有缓冲冲击性能及防滑等使用性能，要求胎面胶有较高抗拉强度，定伸强度，有好的抗撕裂性，优异的耐磨性。在保证这些性能的前提下，要有好的弹性与较低的动态生热，以防止胶的热老化，提高耐疲劳性，延长轮胎使用寿命。为此，选用耐磨性、耐热性好的丁苯橡胶，通过配方设计，增加其定伸强度与抗张强度，但丁苯橡胶反复变形生热大，耐屈挠性差，为克服此缺点，对胎面胶进行分层配方，让丁苯与天然橡胶配合，用作外胎胎面胶，并通过胎面花纹设计，改善其散热条件，以满足轮胎重载、耐磨、弹性好、寿命长的使用要求。

胎侧胶是外胎侧壁覆盖胶，主要作用在于保护胎体帘线不受机械损伤。不受潮它处于轮胎变形最大的部位，要求胎侧胶有突出的抗屈挠疲劳、耐老化龟裂与抗刺伤性能，胎侧胶常选用弹性好、生热小的顺丁橡胶、天然橡胶，掺用顺丁橡胶的胎面胶，低温性能得到提高，用顺丁橡胶与丁苯橡胶并用，性能上可以取长补短，提高轮胎的行驶里程。

轮胎的内胎，要求透气率小、耐热、耐撕裂、伸长率大、永久变形小。由于丁基橡胶具有优异的气密性及高热态抗撕裂性，耐候性优良，抗臭氧性能是天然橡胶的 10 倍以上，因此常选用丁基橡胶作轮胎内胎，内胎中空气压力保持情况见表 2-26。

表 2-26　内胎中空气压力保持情况

品种 / 时间	开始	1 周	2 周	3 周
IR	0. 19	0. 185	0. 185	0. 178
NR	0. 19	0. 165	0. 137	0. 079

从内胎要求透气率低、有耐热性和机械强度三方面考虑，通常选用中不饱和度、门尼粘度大的丁基橡胶，为提高耐寒性和挤出性能，可加适当增塑剂，丁基橡胶不饱和程度较低，与其他胶料配合性差，所以一般不宜与其他胶料并用。为提高强度，常选用炭黑做补强剂，又考虑内胎是薄壁制品，应选择适宜的硫化温度与硫

化时间，以满足制品使用性能和技术要求。

丁基橡胶有很好的电绝缘性、低吸水性，耐老化与耐臭氧性，其性能可见表 2-27、表 2-28、表 2-29。因此非常适合制作高、中、低压电绝缘材料。尤其是户外用耐大气老化的绝缘护套等。用作电缆绝缘层要选择不饱和程度低的丁基橡胶，添加配合剂时要避免加入极性物质影响其绝缘性。用丁基橡胶制作的绝缘电缆，电压可耐 3 万伏。

中不饱和度和高不饱和度丁基橡胶其硫化速度高于低不饱和度丁基橡胶。选用它们制造低硬度密封材料及缓冲器材具有良好的弹性和低温屈挠性。

表 2-27　乙丙橡胶和丁基橡胶的电性能比较

性　能　项　目	乙丙橡胶	丁基橡胶
体积电阻率/(Ω · cm)	10^{15} ~ 10^{16}	10^{15} ~ 10^{16}
介电常数	3 ~ 4	2. 5 ~ 3. 5
介质损耗角正切	0. 15 ~ 0. 4	0. 15 ~ 0. 3
击穿强度/（kV/mm）（交流）	25 ~ 35	35 ~ 45
击穿强度/（ kV/mm）（直流）	55 ~ 70	70 ~ 100

表 2-28　几种绝缘橡胶电性能的耐水稳定性

项　　目	乙丙橡胶	丁基橡胶	天然丁苯橡胶
体积电阻率（原始值)/(Ω · cm)	9.8×10^{15}	1.4×10^{16}	6.4×10^{14}
85℃浸水 168h 后	1.94×10^{15}	2.31×10^{15}	5.38×10^{14}
吸水量（20℃浸水 168h)/(mg/cm^2)	0. 21	0. 26	0. 31
吸水量（85℃浸水 168h)/(mg/cm^2)	1. 35	1. 00	2. 85

表 2-29　几种橡胶耐臭氧性的比较

胶　　种	龟裂出现时间	断裂时间
天然橡胶	8min	15min
氯丁橡胶	1h	1. 5h
丁基橡胶	10h	12. 5h
三元乙丙橡胶	62h	无变化

试验条件：臭氧浓度 0. 044%，150% 拉伸，常温。

由表 2-29 可见，耐臭氧性能更好的是不饱和程度更低、硫化速度更慢的乙丙橡胶。它可以与丁基橡胶以任意比例掺用，乙丙橡胶加入到丁基橡胶中，可使丁基橡胶制品耐热性提高，用来制造各种耐热胶管。把乙丙橡胶掺入其他橡胶中，可改善它们的耐臭氧性和低温性，但会影响其他橡胶的耐油性、粘合性和抗撕裂性。乙丙橡胶适合制造耐热运输带、蒸汽胶管，也适用于码头缓冲器及桥梁减振垫及各种

防水橡胶材料。

氯丁橡胶在火焰中能放出氯化氢气体而阻止燃烧。因此常用通用型氯丁橡胶作耐燃运输带。

耐燃运输带的带芯广泛采用玻璃布为骨架材料。带芯由上下覆盖胶层保护，与物料接触的一面为上覆盖胶，是运输带的工作面，较厚，下覆盖胶为运输带非工作面，较薄。但要求覆盖胶耐磨、耐撕裂、耐冲击。因此上覆盖胶常用氯丁橡胶与天然橡胶并用，以提高耐燃性，下覆盖胶常用氯丁橡胶与丁苯橡胶并用，以提高耐磨性与强度。耐燃运输带可运送带有明火的矿物烧结材料及水泥熟料，也宜用于矿井，以保证安全生产。

三角传动带是机械工业中传递动力用的主要橡胶产品之一。三角带在运转过程中，带中不同结构部位受到的应力不同，分为若干结构层，包布层、强力层、伸长层与压缩层，见图 2-8。

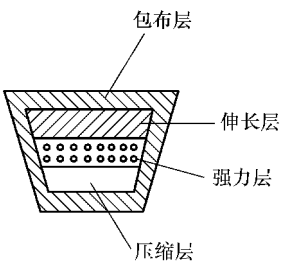


图 2-8　三角带结构图

层与层之间有位移存在，并借助于橡胶层的弹性变形相互联系，橡胶在不断变形过程中产生很大的剪切应力，使产生滞后损失而导致发热。如无级变速三角带，使用时弯曲半径小，生热大，须承受一定的侧压力，要求传送带在使用升温条件下，能保持一定的横向刚性，即在升温条件下，胶料不变软。用氯丁橡胶与天然橡胶并用的三角带包布层，升温不但不变软，反而越用越硬，且有一定的耐油性，延长了使用寿命。层间采用氯丁橡胶与顺丁橡胶并用，氯丁橡胶具有良好的粘结性，使各层紧密联系成整体，减少层间位移，而顺丁橡胶可使胶料弹性增加，动态生热减小，防止三角带早期老化脱层而损坏。三角带压缩层胶用炭黑补强，并加入破碎人造纤维，以增加刚性，这种以氯丁橡胶为主的无级变速三角带耐磨性、耐屈挠性、耐热性都优于天然胶制三角带。

胶管是由内、外胶层和骨架层（纺织品或金属材料）组成的中空管状制品，全胶管无骨架层，因此要求胶料具有一定的硬挺性，用于输送液体、气体或粉状具有流动性的固体物质。根据工作环境、工作介质、工作压力的不同，要求胶管有耐油、耐化学腐蚀、耐压力、耐老化及抗液体或气体渗透等性能。

氯丁橡胶和丁腈橡胶都是极性橡胶，有优良的耐油性，常用来制作耐油胶管。对耐油压力胶管来说，内外胶层尤其是内层胶，要有对油的较好的抗溶胀性，并对气体、液体有较好的抗渗漏性。通常选用丁腈橡胶与氯丁橡胶作为胶管的内层胶。氯丁橡胶与丁腈橡胶有很好的相容性，掺 20% ~30% 氯丁橡胶的丁腈橡胶能提高耐臭氧能力。作为外层胶除有抗油性外，还要有一定的硬挺性，可在胶中掺大量填料，同时在丁腈橡胶中也可掺入丁苯橡胶，但丁苯橡胶掺量不宜超过 20%，否则使抗油性下降。并且门尼粘度变化，不利于压延操作。

丁腈橡胶耐化学药品性好，还可用以制造耐酸、碱的其他橡胶制品。各种橡胶

的耐酸、碱性能见表 2-30。

表 2-30　各种橡胶的耐酸、碱性能

品种 / 介质	盐酸 40%	硫酸 50%	硝酸 10%	氢氟酸	磷酸 80%	碳酸	NaOH 50%	Na_2CO_3	NH_4OH
天然胶	良（66℃）	可（室温）	可	良（65℃）	良（65℃）	可（室温）	良（70℃）	良（65℃）	良（40℃）
丁苯胶	良（20℃）	可（66℃）	差	差（室温）	良（65℃）	可（室温）	良（40℃）	良（65℃）	良（65℃）
丁基胶	良（20℃）	可	可	良（80℃）	良（70℃）	—	良（60℃）	良（90℃）	良（65℃）
丁腈胶	可（20℃）	良	可	差（室温）	良（室温）	可	良（70℃）	良（70℃）	良（70℃）
氯丁胶	可（20℃）	良	可	良（70℃）	良（室温）	差（70℃）	良（90℃）	良（90℃）	良（38℃）

2.10　橡胶的老化及防止

生胶或橡胶制品在贮存和使用过程中会出现变色、发粘、发脆、变硬及龟裂等现象，使橡胶失去原有的性能，以致失去使用价值，这种现象叫做橡胶的老化。许多橡胶制品的失效，往往不是由于使用条件超过其性能允许范围使制品破坏，而是由于老化使制品失效。因此，橡胶的老化是使用橡胶制品中一个很突出的问题，因为它直接影响到橡胶制品的寿命。

2.10.1　影响橡胶老化的因素

1. 氧的作用

在影响橡胶老化的诸多因素中，氧的作用是最大的。其主要机理是使橡胶分子氧化断裂，破坏橡胶分子的正常结构，最后导致橡胶变硬、变脆。上述氧化过程中有的以断链为主，有的以交联为主。天然橡胶以断链为主，故其老化的特征是发粘变软；而顺丁、丁苯、氯丁、丁腈等合成橡胶则以交联为主，因此老化后表现为变硬、变脆。

由于制品的表面直接接触到空气中的氧和光，并受其作用，因此氧化首先在表面进行，然后由表及里深入到橡胶内部。这样，厚橡胶制品，寿命就较长，透气性大的橡胶比透气性小的橡胶容易老化。由于氧化易于在双键和双键附近发生，因此含有双键的橡胶就比不含双键的橡胶容易老化。

2. 臭氧的作用

臭氧也是促使橡胶老化的一个相当重要的因素。虽然地球表面大气中含臭氧量很少，但对橡胶制品特别是在伸长压缩变形的情况下，老化作用很显著。

臭氧的活性比氧高，它对橡胶的作用与氧的作用相似，也是先在橡胶的双键处生成臭氧化物，而后分解，使大分子断链。橡胶臭氧老化的特征是表面裂口或起霜。裂口是橡胶在变形条件下受臭氧作用裂解较深所造成的。而起霜是轻度臭氧化，表面产生极细小的不定向裂纹，破坏橡胶表面光泽的现象。

各种橡胶抵抗臭氧老化的能力不一样。硅橡胶、氟橡胶耐臭氧能力最强，乙丙橡胶、氯丁橡胶次之，天然橡胶、顺丁橡胶最差。

3. 热、光、金属盐及机械疲劳的作用

热对橡胶的老化有两个方面的作用，一个作用是热加速了上面所说的氧化作用，这里所指的热可以是外界环境的温度，也可以是因连续变形内部产生的热，其作用都是一样的。一般来说，温度每升高 10℃ 氧化速度约增加一倍。因此，当温度在 100℃ 以上时，氧化速度非常迅速，许多橡胶制品在常温下可使用几年，而在 100℃ 以上使用时则只有几个月甚至几天就因老化而失效，就是这个缘故。热对橡胶老化的另一个作用是热本身的作用。在隔绝氧气的条件下加热，大多数橡胶在 300 ~ 400℃ 温度范围内即发生分解。而像氯丁橡胶这样的高聚物，在稍低的温度下，也会因脱去氯化氢而损坏。此外，热还会加速硫化胶的链与其他配合剂之间的反应，或使橡胶中的挥发性物质挥发，使橡胶失去原有的优良性能。

光也会引起氧化反应。橡胶吸收光能以后，形成活性基，活性基与氧化合进行氧化反应。在这里，紫外线起主要作用。紫外线除了加速氧化作用外，还能直接引起橡胶的异构化，也会直接引起橡胶的断链与交联。

多价的金属盐也会促使橡胶老化。当在橡胶中含有微量的铜、锰、铁、镍等金属盐类时，都会使橡胶加速老化。

橡胶的机械变形或不断的曲折变形，都会引起橡胶结构的复杂变化、改变橡胶的性能。在力的作用下，橡胶会产生纯机械的氧化作用，在多次变形中，氧化速度会大大加快。

2.10.2 橡胶老化的防止

既然橡胶的老化将直接影响制品的使用寿命，因此要提高橡胶制品的使用寿命，十分重要的一点就是要防止橡胶老化。目前，一般采取以下措施：

1）选用耐老化性能好的橡胶。在分子结构中无双键或少双键的橡胶，一般耐老化性能都比较好，如硅橡胶与氟橡胶最耐热老化，其次是乙丙胶、氯丁胶、天然胶、顺丁胶等。但特种橡胶价格昂贵，必须物尽其用。

2）在橡胶中加入防老剂。常用防老剂有抗氧化剂、抗臭氧剂、紫外线吸收剂、抗疲劳剂、有害金属抑制剂和防霉剂等。在实际应用中，多采取几种防老剂并

用，效果更佳。

3）选用合适的其他配合剂。例如天然橡胶采用适当的促进剂，降低硫磺用量或采用无硫硫化体系，能有效地改善硫化橡胶的耐热老化性能。选用不会促进氧化作用的补强剂和挥发性小、相对分子质量大、粘度高的软化剂都能改善橡胶的热老化性能。在橡胶中加入适当的炭黑（2% ~10%）或将橡胶着成红色，能防止光老化。

4）在橡胶原料中加入适量的蜡类物质，或在制品表面涂以涂料，可以减少表面老化。蜡能在橡胶表面形成一层物理性保护膜，有效地防止静态臭氧老化。

5）正确掌握硫化工艺，不要过硫化或硫化不足，因为两者都使橡胶容易老化。

6）橡胶制品尽量不要受压或暴晒。

由于现代科学技术的发展，可以对橡胶进行各种各样的改性，按照使用上的需要提高某种性能。改性的方法很多，可以添加各种配合剂，也可以根据需要设计特殊的结构，或通过某些化学反应加以处理，还可以几种橡胶按不同的百分比进行接枝或嵌段，甚至可以橡胶与树脂接枝或嵌段。总之，橡胶的改性是提高橡胶性能的重要途径，也是橡胶技术发展的重要环节。

第3章　纤　　维

3.1　纤维的基本知识

纤维是指长度比其直径大很多倍，并具有一定柔韧性的纤细物质。供纺织用的纤维，长度与直径之比一般大于1000∶1。典型的纺织纤维的直径为几微米至几十微米，而长度超过25mm。

20世纪初，粘胶纤维及醋酸纤维的研制成功使世界出现了人造纤维工业，结束了人类只能使用棉、毛、丝、麻等天然纤维进行纺织加工的历史。20世纪30年代中期，聚酰胺、聚酯、聚丙烯腈、聚乙烯醇及聚丙烯的相继问世，诞生了合成纤维工业。1955年，随着超细纤维、聚四氟乙烯纤维、芳族聚酰胺纤维、碳纤维等一大批特种纤维的研制成功，使化学纤维步入了高科技领域，促进了许多工业领域、尖端科学的现代化。经过多年的发展，化学纤维已发展成为门类众多和百余个品种的工业体系。纤维形态除传统的复丝、单丝和短纤维外，先后开发了原纤化纤维、短切纤维、割裂纤维、晶须等，以及经共聚、共混、复合、表面处理和后加工等，构成了花色多样的差别化纤维。

3.1.1　分类

纤维种类繁多，一般可按以下几个方面进行分类：

1. 按其来源和基本组成分类

（1）天然纤维　在自然界中取得的纤维。可分为植物纤维、动物纤维和矿物纤维三大类。

植物纤维主要组成物质是纤维素，因此又可称为天然纤维素纤维。根据纤维在植物上生长部位的不同，它又可分为种子纤维、韧皮纤维、叶纤维和果实纤维。在植物种子上获得的纤维叫种子纤维，如棉、木棉等；在植物茎秆韧皮中获得的纤维叫韧皮纤维，如苎麻、亚麻、黄麻、大麻、罗布麻等；在植物叶子上获得的纤维叫叶纤维，如剑麻、凤梨麻（菠萝麻）等；在植物果实中获得的纤维叫果实纤维，如椰壳纤维等。植物纤维可以做服装、窗帘、墙布、垫罩等，易洗、易熨烫；棉纤维性柔，不能保持褶线，易污、易皱；而麻纤维性刚、强度高、制品挺括、耐磨，但价格较高。由于植物棉麻纤维的资源不足，所以常掺入化学纤维混合纺制而成混纺制品，不仅降低了价格，同时也改善了性能。

动物纤维的主要组成物质是蛋白质，因此又可称为天然蛋白质纤维。它包括毛

发和腺分泌物两大类。在动物披覆的毛发中获得的纤维叫毛绒，如绵羊毛、兔毛、牦牛毛、山羊绒、骆驼绒等。羊毛纤维弹性好、不易变形、不易污染、不易燃、易于清洗，而且能染成各种颜色，色泽鲜艳，制品美丽华贵，经久耐用，并且毛纺品是热的不良导体，给人一种温暖感觉，但最大的缺点是易虫蛀，所以对羊毛及其制品的使用应采取相应的防腐、防虫蛀措施。在昆虫腺分泌物中获得的纤维叫腺分泌物，如桑蚕丝、柞蚕丝、蓖麻蚕丝等。自古以来，丝绸就一直被用作高级服装面料，它滑润、柔韧、半透明、易上色，而且色泽光亮柔和，是一种高级纤维材料。

矿物纤维的主要组成物质是无机纤维，因此又可称为天然无机纤维。矿物纤维是以矿物状埋藏在地下的，包括各类石棉。

（2）化学纤维　用天然的或合成的聚合物为原料，经过人工加工制造的纤维状物体。它分为人造纤维和合成纤维两大类。

化学纤维是指人们利用天然的或合成的高分子化合物为原料，用化学加工的方法，仿照棉花、蚕丝或羊毛的样子所制成的纤维，统称为化学纤维。

人造纤维又称再生纤维，它是用天然聚合物为原料，经过人工加工而再生制得的。其化学组成与原聚合物基本相同。它包括人造纤维素纤维、人造蛋白质纤维和人造无机纤维三大类。人造纤维素纤维又称再生纤维素纤维。它是利用自然界中存在的棉短绒、木材、甘蔗渣、芦苇等含有纤维素的物质制成的纤维，如粘胶纤维（包括普通粘胶纤维、强力粘胶纤维、高湿模量粘胶纤维等）、铜氨纤维、醋酯纤维等。人造蛋白质纤维又称再生蛋白质纤维，是利用天然蛋白质产品为原料，经过人工加工制成的纤维，如大豆纤维、花生纤维、乳酪纤维等。人造无机纤维包括玻璃纤维、金属纤维、碳素纤维等。

合成纤维是指以石油、天然气及从某些农副产品中提取的低分子物质，再通过人工合成和机械加工的方法制成的纤维。它的品种繁多，已经投入工业生产的约有三、四十种，包括聚酯纤维（涤纶）、聚酰胺纤维（尼龙）、聚丙烯腈纤维（腈纶）、聚乙烯醇纤维（维纶）、聚丙烯纤维（丙纶）、聚氯乙烯纤维（氯纶）、聚氨酯纤维（氨纶）等。此外还有特殊用途的纤维，如功能纤维和高性能纤维等，它们的生产量虽然不大，但在国民经济中占有相当重要的地位。

2. 按纤维形态特征分类

（1）长丝　包括由天然纤维中的腺分泌物以及化学纤维加工制得并不经过切断工序的连续丝条，可分为单丝、复丝和变形丝三种。

只有一根纤维的长丝叫单丝，它用于加工细薄的织物，透明度高，如透明袜、面纱巾等。复丝包含多根单丝，一般用于织造的长丝多为复丝。复丝的透明度不如单丝，但强度和弹性比单丝高。变形丝也称“变形纱”“弹力丝”，是指具有（或潜在具有）卷曲、螺旋、环圈等外观特征而呈现蓬松性、伸缩性的单丝或复丝。它包括膨体纱和弹力丝。膨体纱以膨松性为主，弹力丝则以弹性为主。弹力丝根据弹性的大小又可分为高弹丝和低弹丝两种。由变形丝制成的织物改善了合成纤维的

使用性能和外观质量，可直接用于织制仿棉、仿毛和仿丝等不同特性的织物。常见的品种有：高弹锦纶弹力丝、低弹涤纶变形丝和丙纶弹力丝等。

（2）短纤维　它包括天然纤维中的棉、麻、毛纤维以及化学纤维成型后再切成一定长度所得的纤维。化学纤维的短纤维也称为“切断纤维”，主要用于与天然纤维混纺。化学纤维短纤维又可分为棉型纤维、毛型纤维和中长纤维三种。棉型纤维是指长短、粗细与棉纤维相近似的化学纤维，长度一般为 30 ~ 40mm，常用于与棉混纺。毛型纤维是指长度、粗细与毛纤维相近的化学纤维，长度 70 ~ 150mm，常用于与毛混纺。中长纤维是指长短、粗细介于棉纤维和毛纤维之间的化学纤维，长度 51 ~ 76mm，主要用于几种中长化纤混纺，也可用于单独纯纺，织制的织物的风格接近毛织物。

3. 化学纤维按截面形态和结构分类

（1）复合纤维　是具有两种或两种以上成分组成的化学纤维。

（2）异形纤维　用非圆形喷丝孔加工成非圆形截面的化学纤维，可以使织物达到仿棉、仿麻、仿毛、仿丝的效果。

4. 化学纤维按粗细分类

（1）粗特纤维　单丝细度在 0. 11tex 以上的纤维。常见的品种有丙纶粗特纤维，用于织制低档织物如地毯等，可以降低原料成本。

（2）细特纤维　单丝细度在 0. 044 ~ 0. 11tex 之间的纤维。由细特纤维组成的长丝叫高复丝，主要用于织制仿丝绸织物。

（3）超细纤维　单丝细度小于 0. 044tex 的纤维。由超细纤维组成的长丝叫超复丝，主要用于织制人造麂皮。

3. 1. 2　命名

天然纤维的学名即为它的商品名：如棉纤维称为棉，麻纤维称为麻，桑蚕丝纤维称为桑蚕丝或真丝，柞蚕丝纤维则称为柞蚕丝或柞丝。人造纤维中的短纤维一般称为“纤”，如粘胶纤维短纤维称为粘纤，合成纤维中的短纤维一般称为“纶”，如聚酯短纤维称为涤纶，聚酰胺短纤维称为锦纶。

人造纤维长丝的命名在其商品名后加一个“丝”字，如粘胶纤维长丝则称粘胶丝或粘丝，俗称人造丝。合成纤维长丝则在其商品名后加“丝”字，如聚酯纤维长丝称为涤纶丝，聚酰胺纤维称为锦纶丝。各种纤维的命名见表 3-1。

表 3-1　纤维命名一览表

学名	短纤维	长丝	俗　称
棉纤维	棉		
麻纤维	麻		
毛纤维	毛		

（续）

学名	短纤维	长丝	俗 称
桑蚕丝		真丝或桑蚕丝	
柞蚕丝		柞丝或柞蚕丝	
粘胶纤维	粘纤	粘胶丝、粘丝	粘胶、人造棉、人造毛、人造丝
富强纤维	富纤	富纤丝	富纤丝、虎木棉
醋酯纤维	醋酯	醋酯丝	醋酯、醋酯纤维
铜氨纤维	铜氨	铜氨丝	铜氨
聚酯纤维	涤纶	涤纶丝	的确良、聚酯、达克纶、拉夫桑绸
聚酰胺纤维	锦纶、锦纶6 尼龙、锦纶66	锦纶6丝 锦纶66丝	锦纶丝、尼龙
聚丙烯腈纶纤维	腈纶	腈纶丝	奥纶、开司米纶、合成羊毛
聚乙烯醇纤维	维纶	维纶丝	维尼纶
聚丙烯纤维	丙纶	丙纶丝	
聚氯乙烯纤维	氯纶	氯纶丝	
聚氨酯纤维	氨纶	氨纶丝	

3.1.3 主要性能指标

反映纤维品质的主要指标有：物理性能指标、力学性能指标、稳定性能指标、加工性能指标和实用性能指标等。下面介绍几个主要指标。

1. 线密度（纤度）

表示纤维粗细程度的指标简称“纤度”，在我国的法定计量单位中称“线密度”。纤维的粗细或截面可用直径或截面积表示，但测量较繁、误差较大，一般采用与粗细有关的间接指标线密度和支数表示。

（1）线密度 指一定长度纤维所具有的重量，单位名称为特［克斯］，单位符号为 tex，其 1/10 称为分特［克斯］，单位符号为 dtex。1000m 长纤维重量的克数即为该纤维的特数。

（2）支数（或公支） 单位重量（以克计）的纤维所具有的长度。对于同一种纤维，支数越高，表示纤维越细。

线密度是纤维材料的重要指标。单纤维越细，手感也越柔软，光泽柔和且易变形加工。

2. 断裂强度

常用相对强度表示化学纤维的断裂强度，即纤维在连续增加负荷的作用下，直至断裂所能承受的最大负荷与纤维的线密度之比。单位为牛［顿］特［克斯］（N/tex）、厘牛［顿］/特［克斯］（cN/tex）。

断裂强度是反映纤维质量的一项重要指标。断裂强度高，纤维在加工过程中不易断头、绕辊，最终制成的纱线和织物的牢度也高；但断裂强度太高，纤维刚性增加，手感变硬。

3. 断裂伸长率

纤维的断裂伸长率一般用断裂时的相对伸长率，即纤维在伸长至断裂时的长度比原来长度增加的百分数表示：

纤维的断裂伸长率是决定纤维加工条件及其制品使用性能的重要指标之一。断裂伸长率大的纤维手感比较柔软，在纺织加工时，可以缓冲所受到的力，毛丝、断头较少；但断裂伸长率也不宜过大，否则织物易变形。普通纺织纤维的断裂伸长率在 10% ~30% 范围内较合适。但对于工业用强力丝，则一般要求断裂强度高、断裂伸长率低，使其最终产品不易变形。

4. 初始模量

模量是纤维抵抗外力作用下形变能力的量度。纤维的初始模量即弹性模量是指纤维受拉伸而当伸长为原长的 1% 时所需的应力。

初始模量表征纤维对小形变的抵抗能力。纤维的初始模量越大，越不易变形，即在纤维制品的使用过程中形状的改变越小。纤维的初始模量取决于聚合物的化学结构以及分子间相互作用力的大小，也与纤维的取向度或结晶度有关。例如在主要的合成纤维品种中，以涤纶的初始模量为最大，其次为腈纶，锦纶则较小，因而涤纶织物挺括，不易起皱，而锦纶则易起皱，保形性差。

5. 回弹率

将纤维拉伸至产生一定伸长，然后撤去负荷，经松弛一定时间后（30 ~ 60s，视测试器而定），测定纤维弹性回缩后的剩余伸长。可回复的弹性伸长与总伸长之比称为回弹率。

回弹率有两种测定方法：一种叫定负荷回弹率，测定时对每个试样施加一定的负荷；另一种叫定伸长回弹率，测定时固定一定的伸长，如 2% 、3% 或 5% 等。

除上述性能指标外，还有很多指标反映纤维的实用性能，如吸湿性、耐热性、燃烧性、耐候性、耐磨性、耐蚀性、染色性等。

3.2 纤维的性质

纤维的品质优劣，对产品质量有决定性的影响。因此，要求纤维必须具备一定的长度和细度，有较好的吸湿性、保温性和力学性能，也要有一定的化学稳定性。

3.2.1 天然纤维

1. 棉花

棉花的品种很多，质量并不完全一样。刚从棉株上摘下来的棉花，叫做籽棉。

籽棉经轧花机把棉籽除掉，称皮棉，也叫原棉。原棉的每根绒毛，叫做棉纤维。棉纤维的主要性质有：

（1）强度 指棉纤维抵抗外力扭断时的能力。强度直接决定着棉纱或棉布的耐用程度。若从单根纤维来看，粗纤维要比细纤维的强度略大些，但从组成纱线（单位面积）的强度来看，还是细纤维组成的纱线的强度大。棉纤维的强度一般在2.5～3.5g/D之间。影响棉纤维强度的大小除了因品种不同外，主要是纤维的成熟度好坏，即成熟度好的纤维的强度大，反之，就小。

（2）长度 棉纤维的长与短，不仅决定纺纱工艺和纱线支数，而且更主要的能影响成纱的强度、光泽和细度。在纺纱时要把许多根纤维捻合在一起，就必须有一定的长度。如果纤维过短，势必减少纤维与纤维间相互衔接的面积，降低抱合力。这样，经外力作用后，易使纤维间滑脱，使强度降低。棉纤维的长度如果在10mm以下时，就很难纺纱，一般用于絮棉。

另外，棉纤维的整齐度（即一批棉纤维长短一致的程度）也很重要。实践证明，当原棉中的短绒率超过15%时，由于牵伸过程中大量的短纤维成为浮游纤维，而使纱线条干明显恶化，强度显著下降。

棉纤维的长短不仅与生长条件有关，更主要的是与品种有关。一般来说细绒棉和长绒棉的纤维较长，粗绒棉的纤维较短。棉纤维的长度一般在23～33mm间，最长也不超过38mm。

（3）细度 指棉纤维粗细的程度，棉纤维的细度与纱线的品质有密切关系。细纤维往往较粗纤维柔软，天然捻曲也多，纺纱号数小、强度大、质地柔软。因此，棉纤维越细其纺纱价值越高。棉纤维的细度一般在0.02mm左右。

棉纤维的细度与长度的关系是：凡是纤维细的一定长，反之，纤维粗的也必然短。

（4）捻曲性 棉纤维在生长过程中所形成螺旋形扭曲的性质，称天然捻曲性。捻曲性是棉纤维不同于其他纤维的独有特性（细绒棉通常有50～80个捻曲数/cm）。在纺纱过程中，要使纤维与纤维之间相互抱合紧密，除了纤维的长度和加捻外，还需要棉纤维的天然捻曲性好。棉纤维的天然捻曲越多，纤维的品质越好，成纱的强度也越大，反之纱线的强度也越小。棉纤维如果用沸水浸煮和外力挤压，则天然捻曲就会消失。

（5）吸湿性 棉纤维是吸湿性较强的一种纤维，在一般情况下，含水量约9%～10%，最高可达24～27%。棉纤维吸湿后强度可提高10%左右。

（6）导电性 棉纤维不易导电，是良好的绝缘材料。不过，棉纤维绝缘程度的大小，是随自身含有水分的多少及温度高低的不同而异，即含水量越大，温度越高，则绝缘性就越差。

（7）耐热性 棉纤维在100℃以下时，强度不受影响，在120℃时，使纤维泛黄，强度降低，当温度升到150℃时，纤维素便发生分解。

（8）耐碱性　在常温下将棉纤维浸在较浓的（18% ~25%）氢氧化钠溶液中能使纤维产生膨胀，长度收缩，失去天然捻曲而呈管状，这时若对纤维施加张力制止收缩，可使纤维表面产生强烈的光泽，同时强度增加，吸湿性和吸色力提高，以利于印染。所以，生产部门常利用棉纤维的这种性质来提高纱线或棉布的质量。这通常称为“丝光”工艺，该产品称为丝光产品。

（9）耐酸性　棉纤维耐酸性很弱。一般弱酸、稀酸对棉纤维的损伤较小；强酸、浓酸则使纤维炭化。所以棉织品若沾到强酸后，会马上破裂。

2. 羊毛

羊毛是重要的纺织纤维之一，其品种有绵羊毛、山羊绒等。羊毛分级主要是根据其长度、细度及整齐度等。其中细度是决定羊毛品质优劣的最主要指标。羊毛的主要性质有：

（1）长度和细度　羊毛的长度、细度与羊毛的品种和在羊身上的部位有关。不同品种细毛的长度约为 40 ~120mm，细度为 0. 07mm 左右。不同品种的异质毛的长度约在 70 ~250mm 间，细度可达 0. 2mm 以上。

羊毛的长度与细度的关系是：通常是长的必粗，短的必细。而纺纱要求是：细度相同，长度长的可纺价值高，成纱质量好。

（2）吸湿性　羊毛是吸湿性较强的一种纤维，在一般情况下，含水量为 6% ~14%，若在潮湿的空气中吸水量可达 35% 左右，但手感并不觉得潮湿。羊毛吸水后强度下降 14% 左右。

（3）缩绒性　是羊毛的重要特性之一，毛纺业常将其织品用热肥皂液处理，并经反复揉搓和施加压力，使织品紧缩加厚。经过这样处理后，可改善产品的外观，增加美感。

（4）弹性　在通常情况下，羊毛呈自然弯曲状态用外力拉直后消除外力时，仍可恢复其原来的状态，这个性质称为弹性。弹性是羊毛的重要特性之一，对其织品的外观挺括和耐穿耐用关系极大。如用毛料制作服装，经长时间的穿用也不易变形和破裂，地毯能经得起长期踩踏不破，在很大程度上也是取决于羊毛的弹性。

（5）耐碱性　碱类对羊毛的腐蚀作用是随着碱的种类、浓度、温度和时间的长短不同而不同。如将羊毛放在 5% 的氢氧化钠溶液中煮沸 20min 会全部溶解；若浸在 38% 的氢氧化钠溶液中，温度控制在 19℃时放置 5min，不仅对羊毛无损伤，反而还能增加光泽和强度。因此，在毛纺工业上常利用这种特性来处理产品，以美化毛织品的外观。其他如纯碱、肥皂等弱碱液，一般来说对羊毛的损伤较小，但溶液过浓，温度过高或时间过长，也会使羊毛发生卷缩现象，影响外观和强度。所以，当用弱碱液洗涤毛织品时，也要注意碱的浓度、温度和洗涤时间。

（6）耐酸性　酸对羊毛的影响和棉纤维相反。若将羊毛浸入稀硫酸中，虽连续煮沸数小时也不受损伤，毛纺工业常利用这一原理来消除羊毛中的杂质。经过酸液处理后还能增加羊毛对染料的亲和力。但如果将羊毛浸入 30% 的硫酸液中，在

温度上升时，也会损伤羊毛。

（7）耐光性 羊毛如果长时间受到日光暴晒会失去光泽，颜色泛黄，强度和弹性下降，手感粗糙，对染料的亲和力减弱。所以当穿用过的毛织品再复染时，因织品的各部位受日光照射的程度不同，经复染后的颜色很难均匀一致。

（8）耐水性 羊毛若长时间浸入热水后，会降低强度，甚至遭受损伤。如当水温在80℃以下时对羊毛影响不大，如果超过80℃，甚至在110℃时，使羊毛明显受损。因此，若用热水或蒸汽处理毛织品时，要当心温度和时间。

3. 蚕丝

蚕吐丝结成的丝层称为蚕茧。蚕茧因蚕的品种（包括饲料不同）不同而不同，其种类很多。我国放养的有桑蚕、柞蚕和木薯蚕等，但以桑蚕和柞蚕为主。蚕丝的主要性质有：

（1）色泽 桑蚕丝的色泽以白色为主，但因受分泌物的影响，也有少量带浅绿色或淡黄色；精炼后洁白光滑，手感柔软细腻。柞蚕丝呈淡棕色或深黄色，精炼前光泽暗淡，精炼后富有光泽，但手感不如桑蚕丝柔软细腻。

（2）强度和伸长性 拉断生丝时所需的外力称强度。生丝的强度一般为2.6～4.4cN/dtex，是天然纤维中强度较大的一种。

伸长率是指生丝在拉断时所伸长的长度与原长之比，称伸长率，伸长率通常用%表示。桑蚕丝的伸长率为15%～20%，仅次于羊毛。柞蚕丝的强度和伸长率比桑蚕丝略小些。

（3）传热性和导电性 蚕丝传热性差，其保温性优于棉、麻纤维。蚕丝也是电的不良导体，其绝缘性能优于棉、麻等纤维。

（4）吸湿性 蚕丝是由若干根茧丝并合而成，而构成茧丝主体的丝质，因其细小，纤维中间有孔隙，是一种多孔性物质，加之丝质是由含有多种亲水性的氨基酸所组成，所以它的吸水性极强，散发水分也很快。在通常情况下吸水量为11%～13%，最高可达30%以上。蚕丝经吸湿后的强度下降4%左右。

（5）耐碱性 强碱溶液（如氢氧化钠等）能使蚕丝溶解，温度越高，浓度越大，则溶解越快；弱碱液如纯碱等，若浓度大，湿度高和时间长，也能损伤蚕丝。

（6）耐酸性 蚕丝对酸类有相当大的抵抗力，但也随酸的种类、浓度和温度的不同而异。如将蚕丝浸在浓硫酸或浓盐酸中，则能溶解变成黑色。但有机酸如醋酸、蚁酸、酒石酸等，如果浓度和温度适宜，不仅对蚕丝无损伤，反而可增加光泽。

（7）耐盐水性 食盐水对蚕丝的影响很大。据试验，如果把蚕丝浸在0.5%的食盐水中15个月能全部损坏。所以当人们穿用丝绸衣衫时，因常被汗水浸透，而往往出现一些黄棕色斑点，便是与盐分有关。

4. 麻

麻纤维是从麻的茎部剥取下来的韧皮（表皮）作为纺织用的原料，它同棉花

一样，同属于纤维素纤维。由于麻的品种不同，其可纺性差异很大。目前，可供纺织用的只有苎麻和亚麻两种，其余像黄麻、胡麻和青麻等，因纤维粗硬，不宜纺纱，多用于织造麻袋、绳索和高级纸张（如币纸、盘纸等）的原料。

（1）苎麻　是一种多年生的草本植物，是重要的轻纺原料之一。

苎麻每年可收获 2 ~ 3 次。根据收获期的先后有头麻（春麻）、二麻（月麻）和三麻（寒麻）之分，其中以二麻的纤维品质最好。苎麻的用途很广，除可供纯纺织造麻布（亦称夏布）或与棉花、蚕丝、化纤等混纺、交织织成结实耐用的织品外，还可织造降落伞、帆布、帐篷及各种防雨用品等。另外也是绳索、滤布以及高级纸张的原料。

（2）亚麻　是一年生的草本植物，我国种植的亚麻有长茎亚麻和短茎亚麻两种。长茎亚麻细柔长软，纤维含量多，是一种很好的纺织原料；短茎亚麻的纤维含量少，品质也差，因而多取其种子榨亚麻仁油，作为工业原料。

亚麻的特征与苎麻相似，但品质较苎麻稍差些。亚麻织品除用作衣料外，还可用于制作帆布、帐篷和绳索等。

除苎麻和亚麻外，还有黄麻、胡麻和青麻等。它们除了织制粗麻布外，也是制造麻袋、绳索以及造纸的极好原料。

麻纤维具有强度大（3. 5 ~ 5. 3cN/dtex）、透气性好、散热快、弹性差和吸湿性好等特点。麻的含水量一般在 12% 左右，吸水后能迅速膨胀，且强度可提高 20% ~ 30% 。对麻纤维的品质要求主要从脱胶、强度、斑疵、色泽和长度等方面来考核。

3. 2. 2　人造纤维

人造纤维是指人们利用天然高分子化合物为原料，经过化学处理和机械加工合成的。其中用含有纤维素为原料而制成的纤维，叫人造纤维素纤维；用含有蛋白质为原料而制成的纤维，叫人造蛋白质纤维。

人造纤维包括粘胶纤维、醋酸纤维和大豆蛋白质纤维等多种。其中粘胶纤维是人造纤维中的一个最主要品种，约占人造纤维总产量的 90% 以上。此外，玻璃纤维也是人造纤维中的一种，我们后面加以讨论。

1. 粘胶纤维

（1）概述　粘胶纤维（Viscose fibre）是以天然纤维素为基本原料，经纤维素黄酸酯溶液纺制而成，是再生纤维素纤维（Regenerated cellulose fibre）系的一个品种。这类纤维也可称为纤维素或水化纤维素纤维。根据生产工艺不同，该系列产品中还有铜氨纤维（Cuprene fibre）、醋酯纤维（Acetate fibre）和再生蛋白质纤维（Regenerated protein fibre）等。目前世界范围内，纤维素纤维产品中 90% 以上是粘胶纤维。

粘胶纤维主要原料是木材、芦苇、甘蔗渣等，具有吸湿性、透气性和染色性较好、成本低廉等优点，在化学纤维中占有不可忽视的地位。粘胶纤维与合成纤维按

一定比例混纺或交织，可以相互取长补短，提高织物的性能。通过各种方法对粘胶纤维的改性，可以制得性能优良或具有特殊功能的纤维。

（2）性能与应用

1）强度：粘胶纤维在干燥时的强度，相当于同支数棉纱强度的85%～90%；若吸湿后其强度会降低40%左右（但干燥后仍可恢复其原强度），所以其织品牢度较棉织品差些。

2）吸湿性：在一般情况下，粘胶纤维的含水量为12%～14%，最高可达30%。所以其织品在吸水性和染色鲜艳等方面都优于棉织品。粘纤织品最宜做服装衬里或夏令服装用料等。

3）延伸性：粘胶纤维在干燥时延伸为20%～24%，浸水后迅速膨胀，长度收缩，变厚发硬，但干燥后（收缩除外）又恢复其软薄状态。所以其织品在穿用时易变形、出皱纹并产生下垂现象。粘胶纤维的缩水率较大，一般为6%～10%。其织品如果用尿素或甲醛等树脂处理，使缩水率和水洗时强度下降等性能均有改善。

4）耐磨性：粘胶纤维的耐磨性和弹性要比羊毛及棉纤维差，特别是在水洗后更为明显。所以其织品在穿用时易起毛或破裂。

5）化学稳定性：粘纤的耐酸性比棉纤维差，遇强碱后能迅速膨胀，强度降低，并易被氧化剂氧化脆裂。

综上所述，由于粘胶纤维的基本原料是天然纤维素，它的基本组成与棉纤维相同，因此某些性质与棉极为相似，如吸湿、透气、易染色、抗静电和易于纺织加工等。制成的织物花色鲜艳，穿着舒适。而且它的纤度和长度可按应用要求调节，这一点又优于棉纤维。很明显，粘胶纤维的这些特性也正是合成纤维的不足。但由于粘胶纤维的大分子链聚合度较棉纤维低，分子取向度较小，分子链间排列也不如棉纤维紧密，因此某些性能较棉纤维差，如干态强度比较接近于棉纤维，而湿态强度远低于棉纤维。棉纤维的湿态强度往往大于干态强度，约增加2%～10%；而粘胶纤维湿态强度大大低于干态强度，通常只有干态强度的60%左右。另外，粘胶纤维缩水率较大，高达10%。同时由于粘胶纤维吸水后膨化，使粘胶纤维织物在水中变硬。此外，粘胶纤维的弹性、耐磨性、耐碱性较差。

粘胶纤维可以纯纺，也可以与天然纤维和其他化学纤维混纺。粘胶纤维应用广泛，粘胶纤维长丝又称人造丝，可织成各种平滑柔软的丝织品。毛型短纤维俗称人造毛，是毛纺厂不可缺少的原料。棉型粘胶短纤维俗称人造棉，可以织成各种色彩绚丽的人造棉布，适用于做内衣、外衣以及各种装饰织物。

高湿模量粘胶纤维，我国称之为富强纤维，其大分子取向度高，结构均匀，在坚牢度、耐水洗性、抗皱性和形状稳定性方面更接近优质棉。俗称“虎木棉”，国家统一名称叫“富纤”。

2. 玻璃纤维

玻璃纤维也是人造纤维中的一种，属于无机纤维。它是由熔融的玻璃拉成或吹

成极细的纤维状材料。任何质地再好的玻璃，如果遭到碰撞后也要碎的。但是，如果把熔融的玻璃拉成横截面只有毛发 1/4 的细丝以后，则玻璃分子便有秩序地排列起来，形成表面光润、性能独特的玻璃纤维。其抗拉强度骤然增大，为丝、麻的 3 倍，加之它具有抗高温、耐腐蚀、电绝缘性能好和加工成型容易等优点。玻璃纤维作为增强材料，能获得性能较许多传统材料更为优良的复合材料，具有轻质、高强等特性，它是很有发展前景的新兴材料之一。因此，它不仅在民用方面，而且在国防、石油、化工、航空、造船、建筑等工业部门均被广泛采用。

（1）玻璃纤维分类　通常可按碱量分为无碱玻璃纤维（含碱 1% ~2%）、中碱玻璃纤维（含碱约 12%）、高碱玻璃纤维（含碱 >14%）和特种玻璃纤维；按形态分为连续玻璃纤维、定长玻璃纤维及玻璃棉；按特殊性能分为光导纤维、高弹模量纤维、高强度玻璃纤维、高硅氧玻璃纤维、耐碱玻璃纤维及耐高温玻璃纤维；按单纤维直径分为初级玻璃纤维（直径 >10μm）、高级玻璃纤维（直径 3 ~7μm）及超细玻璃纤维（直径 <1μm）等。

（2）玻璃纤维的性质

1）细度：玻璃原丝或纱线一般采用定长制的线密度和定质制的支数等间接指标表示。如定长制的线密度（单位长度的质量）是用 1000 米长度的原丝或纱线的克数表示；定质制的支数是每克质量纱线的米数表示。同种纤维才能用线密度或支数比较其粗细。

2）吸湿性：玻璃纤维在潮湿环境中能吸收空气中的水分。因玻璃结构中不存在亲水基团，只是在表面吸附少量水分，但少量的吸附水却对纤维的抗拉、疲劳、耐磨及静电等产生不良影响。玻璃纤维的吸湿性与其化学成分有关，含碱量越多、吸湿性越强。

3）强度高：当玻璃纤维的单丝直径为几个微米时，其抗拉强度可达 4000 ~ 5000MPa，约为普通钢的 10 ~12 倍，超细玻璃纤维的抗拉强度高达 10000MPa，纤维越细，含碱量越低，表面缺陷越少，其强度越高。纤维强度还与制造条件特别是随分子定向的程度而变化，分子定向增加，使强度、弹性模量增大，但延长率急剧减少。玻璃纤维的高强特性使其成为新型的工程材料和结构材料。

4）电绝缘性好：玻璃纤维具有优良的电绝缘性能，在电气工业上作为各种电气绝缘材料。玻璃的化学组成是影响电性能的主要因素，此外还与纤维表面状态、含水率等有关，例如无碱纤维在常温下的体积电阻率大于 $10^{15}\Omega\cdot m$，石英纤维和高硅氧纤维达 10^{14} ~ $10^{15}\Omega\cdot m$。采用无碱纤维做电机绝缘材料可提高电机绝缘等级。

5）耐热材料：玻璃纤维的耐热性较有机纤维好得多，即使是耐热性好的聚酯纤维软化点也只有 260℃，使用温度则在 230℃以下，但玻璃纤维加热至 200℃，其强度不降低，性能也无明显变化。中碱纤维的软化点为 770℃，无碱纤维的软化点为 840℃，因此，含碱纤维在 450℃，无碱纤维在 600℃时失去实用强度。玻璃纤维

的耐热性与化学组成有关，如化学组成中高熔点组分（SiO_2、Al_2O_3、ZrO_2、Cr_2O_3）含量增多，纤维的耐热性将提高。

6）化学稳定性：玻璃纤维的耐水性与其含碱量有关。通常无碱纤维耐水性最好，中碱纤维次之，高碱纤维最差。玻璃纤维长期置于潮湿环境中，水能溶出纤维组分中的碱，溶出的碱进一步和纤维组分中的 SiO_2 发生化学反应，破坏了玻璃纤维的硅氧结构，使其逐渐变成粉末。玻璃纤维的耐酸性与其含碱量也有关，通常无碱纤维在酸作用下，除 SiO_2 组分外，其他各组分都可被酸溶出，严重时溶出量可达48%，从而使无碱纤维遭到侵蚀。含碱纤维与酸作用时可生成一层坚固的硅胶薄膜，阻止进一步与酸作用，因此含碱纤维耐酸性较好。玻璃纤维的耐碱性却很差，无论是中碱纤维还是无碱纤维，在碱侵蚀下都很快腐蚀而失去强度，即使在普通水泥中的氧化钙也能使纤维遭到破坏，其原因是碱能与玻璃纤维中的主要氧化物（SiO_2）发生化学反应，使硅氧骨架遭到破坏，因此，用于水泥或混凝土中的纤维可采用氧化锆或氧化钛含量高的钠钙硅酸盐玻璃制成的抗碱玻璃纤维，也可对玻璃纤维进行表面技术处理等。

（3）玻璃纤维的应用　玻璃纤维化学稳定性好，不论是石油、化工、有色或黑色冶金等工业部门，都需大量滤布。若采用棉、毛织品，由于强度和耐蚀性差，几天之后就得更换。如使用玻璃丝滤布，使用寿命可提高30多倍，这既可节约大量棉、毛织品，又能提高生产效率。

过去制造高功率电动机使用玻璃纤维织物做绝缘体，可耐130℃以上的高温，隔热保温效果非常好，既安全又可靠。

由于玻璃纤维的导热系数低，再加上空隙中充有大量空气。所以既耐热隔音，又可抗冻抗震，并且施工方便，价格便宜。因此，它大量用作工业保温材料，是一种质轻、高效、耐久、经济的材料。

玻璃纤维可以与各种有机或无机材料制成复合材料，如玻璃纤维增强塑料、玻璃纤维增强橡胶以及玻璃纤维增加石膏、水泥制品等。还可采用有机被覆处理提高其柔性，组成各种软制品，如包装布、窗纱、贴墙布、蓬盖布及特种防护服等。由于玻璃纤维具有一些其他材料不具备的优异特性，因而在国防、尖端工业中也成为不可缺少的材料。

3.2.3 常用合成纤维

合成纤维是利用石油、天然气、煤和乙炔等为原料，经合成、加工所制成的纤维。

合成纤维的品种很多，不下几十种。但从性能、适用范围等条件来看，使用较多的有尼龙、涤纶、腈纶、维纶、氨纶和丙纶等品种。它们的共同特点是：强度高、弹性好、耐磨、易洗易干，不霉不蛀和化学稳定性好。它不仅是衣着用品的良好原料，而且在国防、化工等方面也有着广泛的用途。

1. 聚酯纤维

（1）概述　聚酯纤维的品种很多，但目前主要品种是聚对苯二甲酸乙二酯纤维，英文缩写为 PET，我国将含聚对苯二甲酸乙二酯组分大于 85% 的合成纤维称为“涤纶”，俗称“的确良”，目前所谓“聚酯纤维”通常指聚对苯二甲酸乙二酯。

聚酯纤维具有一系列优良性能，如可纺性好、断裂强度和弹性模量高，回弹性适中，热定型优异，耐热和耐光性好，织物具有可穿性等，故有广泛的服用和产业用途。目前，聚酯纤维已成为发展速度最快的合成纤维品种。目前产量已占合成纤维总产量的 40% 以上，跃居第一位。

（2）性能与应用

1）强度：干态强度 4 ~ 7cN/dtex，湿态下强度不下降。聚酯短纤维的断裂强度为 4. 14 ~ 5. 72cN/dtex（伸度为 35% ~ 50%），长丝一般为 3. 78 ~ 5. 28cN/dtex（伸度为 20% ~ 32%），高强度丝为 5. 54 ~ 7. 92cN/dtex（伸度为 7% ~ 17%），仅次于聚酰胺纤维。聚酯纤维的耐冲击强度比聚酰胺纤维高 4 倍，比粘胶纤维高 20 倍。

2）模量高：在大规模生产的合成纤维中，以聚酯纤维的初始模量为最高，其值可高达 14. 01 ~ 17. 55GPa，这使织物的尺寸稳定、不变形、不走样。

3）耐磨性：聚酯纤维的耐磨性仅次于聚酰胺纤维，比其他合成纤维高。表 3-2 为不同混纺比的毛涤织品和涤棉织品的耐磨情况。

表 3-2　毛涤织品和涤棉织品的耐磨情况

涤纶含量（%）	毛涤混纺织品（次）	涤棉混纺织品（次）
0	2600	90
20	3400	120
40	3900	160
60	5600	310
80	6400	420
100	7600	650

注：表中数字是织品被磨碎时的摩擦次数。

4）弹性：聚酯纤维的弹性非常好，与羊毛相似，当伸长为 5% ~ 6% 时，去负荷后伸长几乎完全可以回复。特别是在湿态下的弹性仍能保持和干态一样。聚酯纤维的耐皱性超过其他任何纤维，所以用涤纶为原料织成的纯纺或混纺织品，经 180℃高温定型后，虽经多次揉搓，水洗后仍不褶皱，一样挺括。

5）耐热性：聚酯纤维的软化点为 230 ~ 240℃，熔点 255 ~ 265℃，分解温度为 300℃左右，比聚酰胺耐热性好。聚酯纤维在 150℃的空气中加热 1000h 才稍有变化，强度下降也不超过 50%。而其他纤维在此条件下，仅加热 200 ~ 300h 即可分解。

6）化学稳定性：聚酯纤维在常温下对酸、碱液很稳定，但不耐浓酸（1.84 g/cm^3 硫酸）和热碱（100℃、40% 的氢氧化钠）。在一般情况下能溶解涤纶的有浓硫酸，在100℃时能溶解聚酯纤维的有80%的苯酚液和二氯化苯溶液。聚酯纤维不怕虫蛀，也不发霉。

7）吸湿性：聚酯纤维的吸湿性在合成纤维中是较低的。在通常情况下，聚酯纤维的回潮率仅为0.4% ~0.5%，在潮湿时也不超过1%，仅低于聚丙烯腈纤维（1% ~2%）和聚酰胺纤维（4%），因而其湿强度下降小，织物易洗快干。不过，因其吸湿性小，透气性差，所以织品的吸湿力差，其成衣在夏季穿用时会感到闷热，不太舒服。

此外，聚酯纤维的耐光性仅次于聚丙烯腈纤维，还具有较好的耐蚀性和耐微生物作用。

由于聚酯纤维弹性好，织物有易洗易干、保形性好、免熨等特点，所以是理想的民用纺织材料。可纯纺或与其他纤维混纺制作各种服装及针织品。在工业上，可作为电绝缘材料、运输带、绳索、渔网、轮胎帘子线、人造血管等。

聚酯纤维作为纺织材料存在一些缺点，如染色性不良、吸湿性差、织物易起毛起球、经摩擦后易产生静电等，聚酯纤维用作帘子线时，与橡胶的粘合性差。聚酯纤维通过改性，可以生产出具有良好舒适性和独特风格的聚酯差别化纤维。

聚酯改性可在制造纤维的各个阶段进行，改性的方法大致可分为两类。一类是化学改性，包括共聚和表面处理；一类是物理改性，包括共混纺丝、变更纤维加工条件、改变纤维形态以及混纤、交织等。

2. 聚酰胺纤维

（1）概述　聚酰胺纤维（Polyamide fibre）是指分子主链由酰胺键连接起来的一类合成纤维，各国的商品名称各不相同，例如我国称聚酰胺纤维为“锦纶”，是因为在我国首批生产聚酰胺树脂的是辽宁省锦西化工厂，故取名锦纶。美国称“尼龙”，前苏联称“卡普龙”（Kapron）等。由于聚酰胺纤维具有优良的物理性能和纺织性能，发展速度很快，在合成纤维产量中一直居首位，但从1972年开始为涤纶所超过而退居第二位。由于新纤维和新品种的开发以及老品种的改性，估计今后聚酰胺纤维的绝对产量仍会不断增长。

聚酰胺有许多品种，目前工业化生产及应用最广泛的仍以聚酰胺6和聚酰胺66为主。聚酰胺1010是我国的特有品种，以蓖麻油为原料。

除脂肪族聚酰胺纤维外，还有含脂肪环的脂环族聚酰胺纤维，含芳香环的脂肪族（芳香族）聚酰胺纤维等。根据国际标准化组织（ISO）的定义，聚酰胺纤维仅包括上面几种类型的纤维，而不包括芳香族聚酰胺纤维。下面主要介绍聚酰胺66和聚酰胺6两大品种。

（2）性能与应用　聚酰胺纤维是合成纤维中性能优良、用途广泛的品种之一。其性能特点如下。

1）密度小，聚酰胺纤维的密度为 1.14g/cm^3，在“四大纶”中最轻。在所有纤维中，聚酰胺纤维的密度仅高于聚丙烯和聚乙烯纤维。它比棉花轻 35%，比粘胶纤维轻 25%，用同样重量的纤维可织出较多的织品。

2）强度高，耐冲击性好，聚酰胺纤维的结晶度、取向度以及分子间作用力大，因此强度也较高。聚酰胺纤维的断裂强度远比天然纤维高，在合成纤维中是最大的一种，在一般情况下比羊毛高 3～4 倍，比棉花高 1～2 倍，比粘胶纤维高 3 倍左右。一般纺织用聚酰胺长丝的断裂强度为 4.4～5.7cN/dtex，作为特殊用途的聚酰胺强度丝断裂强度为 6.2～8.4cN/dtex。聚酰胺纤维的吸湿率较低，它的湿态强度约为干态的 85%～90%（粘胶纤维仅为 60%）。

3）弹性好，耐疲劳性好，聚酰胺纤维的回弹性极好，例如聚酰胺 6 长丝在伸长 10% 的情况下，回弹率为 99%，在同样伸长的情况下，而聚丙烯腈纤维能回复 75%。聚酯长丝回弹率为 67%，而粘胶长丝的回弹率仅为 32%。聚酰胺纤维能耐多次变形，其双折次数可高达 40000 次，比粘胶纤维高 100 倍，比棉花高 10 倍。聚酰胺纤维还具有良好的耐低温性能，即使在 -70℃下，其回弹性变化也不大。

由于聚酰胺纤维的弹性好，因此它的打结强度和耐多次变形性很好。普通聚酰胺长丝的打结强度为断裂强度的 80%～90%，较其他纤维高。聚酰胺纤维耐多次变形性近于涤纶，而高于其他所有化学纤维和天然纤维，因此聚酰胺纤维是制作轮胎帘子线较好的纤维材料之一。例如，在同样试验条件下，聚酰胺纤维耐多次变形性比棉纤维高 7～8 倍，比粘胶纤维高几十倍。

4）耐磨性好，聚酰胺纤维的耐磨性高于其他任何纺织纤维。它比棉花高 4 倍，比羊毛高 8 倍，比粘胶纤维高 50 倍。因此，用锦纶与粘胶纤维、棉花等混纺，其产品的耐磨性都有明显的提高，并且随着锦纶含量的增加而提高。

5）化学稳定性好，在一般条件下，聚酰胺纤维能耐乙醚、碱液、肥皂液等的浸蚀。在常温下能溶解聚酰胺纤维的有：浓硝酸、浓盐酸、浓硫酸、浓甲酸等。聚酰胺纤维在冰醋酸中会发生膨润，加热后能溶解。聚酰胺纤维本身不含有营养物质，所以不怕虫蛀。此外，聚酰胺纤维还具有不发霉、染色性较好的特点。

6）吸湿性差是聚酰胺纤维的缺点之一，在一般情况下吸水量为 4%～4.5%，在潮湿时也只有 8%，因而其织品易洗、易干。不过，因其吸湿性小，所以在夏季穿用纯聚酰胺纤维织品时，会感觉闷热，不舒适。

7）耐热性差，聚酰胺纤维在 100℃以上时其强度明显下降，若超过 170℃时则软化以至熔融，如用熨斗熨烫时，温度不可过高，还需垫一层布，否则，就有粘结、熔化的危险。同时，聚酰胺纤维的保型性和耐日晒性较差，若长时间暴晒会泛黄，影响强度。

8）摩擦起电，聚酰胺纤维织品经摩擦后易产生静电现象，吸附灰尘，并且易产生“小球”、勾丝等弊病，影响外观。

聚酰胺纤维有许多优良性能，但也存在一些缺点。对这些缺点需要加以改进，

以适应各种条件。

改进聚酰胺纤维性质的方法一般分为化学改性法和物理改性法两种。化学改性的方法有共聚、接枝等，以改善纤维的吸湿性、耐光性、耐热性、染色性和抗静电性；物理改性的方法有改变喷丝孔的形状和结构，改变纺丝成型条件和后加工技术等，以改善纤维的蓬松性、伸缩性、手感、光泽等性能。

聚酰胺纤维可以纯纺和混纺，用作衣料及针织品，特别适用于制造单丝、复丝弹力丝袜。工业上主要用作轮胎帘子线、工业滤布、渔网、安全网、运输带、绳索以及降落伞、宇宙飞行服等军用物品。地毯用聚酰胺纤维也在逐年增长。

3. 聚丙烯腈纤维

（1）概述　聚丙烯腈（PAN）纤维的英文名称为 polyacrylonitrile fibre 或 polyacrylic fibre，通常是指含丙烯腈 85% 以上的丙烯腈共聚物或均聚物，国内简称腈纶。丙烯腈含量在 85% 以下的丙烯腈共聚物纤维则称为改性聚丙烯腈纤维或改性腈纶。目前在世界上产量仅次于聚酯纤维和聚酰胺纤维，在合成纤维中居第三位。

聚丙烯腈大分子链上的腈基极性很大，使大分子间的作用力强，分子排列紧密，因此丙烯腈均聚物纺制的纤维硬而脆，难于染色。少量共聚单体的加入，即可改善上述缺点，提高应用价值。目前大量生产的聚丙烯腈纤维大多由丙烯腈的三元共聚物制得。它具有羊毛般的手感，蓬松性好，有“合成羊毛”之称。

腈纶膨体纱是根据腈纶具有热塑性的特点，经过热处理制成的。用这种膨体纱编织成的服装，不仅保暖性好，手感丰满而且质轻、柔软，是织制毛衣裤及针织品的良好材料。

（2）性能与应用　聚丙烯腈纤维具有以下特性：

1）密度小：腈纶的密度为 1.24 ~ 1.27g/cm^3（羊毛为 1.32g/cm^3），用同样重量的纤维，可比羊毛纺出更多的纱，织出较多的织品，并且柔软性和保暖性能都好。

2）吸湿性小：在一般情况下，腈纶仅能吸湿 1.2% ~2% 的水分，最高也只有 3% 左右，所以腈纶织品易洗、易干。

3）断裂强度好：腈纶短纤维的干态断裂强度为 2.2 ~ 4.4cN/dtex，湿态为 1.76 ~3.96cN/dtex，比羊毛高 1 ~2.5 倍。所以，用腈纶织成的毛衣或呢料，要比纯毛织品耐穿耐用。

4）弹性模量高：腈纶的弹性模量仅次于聚酯纤维，比聚酰胺纤维高 2 倍，因此腈纶的保型性好。

5）化学稳定性好：有很高的化学稳定性和较好的耐热性。腈纶对酸、氧化剂及有机溶剂极为稳定；在常温下，酸、碱或有机溶剂（苯、乙醚、丙酮、汽油、四氯化碳、三氯乙烷等）对腈纶均无影响。但在高温下（100℃以上）或在浓酸、浓碱液中会降低强度，甚至溶解。

6）耐日晒性能好：耐光性和耐辐射性优异，在所有大规模生产的化学纤维

中，除了聚四氟乙烯纤维外，就算腈纶了。腈纶对日光及大气作用的稳定性好。经日光和大气作用一年后，大多数纤维均损失原强度的 90% ~95%，而腈纶的强度仅下降 20% 左右。因此，腈纶织品是极宜做窗帘、幕布、帐篷、苫布等室外用品的。

7）优良的耐霉菌和耐虫蛀性。腈纶对空气、土壤、淡水和海水中的霉菌一般都能抵抗。如将腈纶埋在热带气候（31℃，相对湿度 97%）的土壤中，经六个月后未发现受损伤的痕迹，而棉制帆布在同样条件下进行试验，十天内即完全腐烂。腈纶一般不发生虫蛀现象。

8）弹性差：腈纶的弹性和抗皱性能较差，特别是回弹力差，柔软性接近于羊毛。因此，腈纶织品的保型性不如纯毛织品。

9）腈纶织品经穿用后易产生静电、易吸附灰尘、易脏、易起球等。

腈纶的强度并不高，耐磨性和抗疲劳性也较差。在回弹性和卷曲性方面，与羊毛存在很大的差距。随着合成纤维生产技术的不断发展，复合聚丙烯腈纤维以及各种改性聚丙烯腈相继出现，如高收缩、抗起球、亲水、抗静电、阻燃、细纤度、异型截面等品种都已有商品生产。

腈纶广泛用来代替羊毛，或与羊毛混纺制成毛织物等，可代替部分羊毛制作毛毯和地毯等织物，还可作为室外织物，如滑雪外衣、船帆、军用帆布、帐篷等。

聚丙烯腈中空纤维膜具有透析、超滤、反渗透和微过滤等功能，可用于医用器具、人工器官、超纯水制造、污水处理和回用等。

共聚单体含量尽量降低的普通腈纶，经预氧化和炭化，可获得含碳量 93% 左右的耐 1000℃高温碳纤维，在更高温度下热处理可得到耐 3000℃高温的石墨纤维。

4. 聚丙烯纤维

（1）概述　聚丙烯（PP）纤维是以丙烯聚合得到的等规聚丙烯为原料纺制而成的合成纤维，我国简称为丙纶。丙纶产量仅次于涤纶、锦纶和腈纶，成为合成纤维的第四大品种。

纤维级聚丙烯的相对分子质量为 18 万 ~30 万，比聚酯和聚酰胺高得多。等规聚丙烯相对分子质量分布的分散性较大，一般为 4 ~7，而聚酯和聚酰胺只有 1.5 ~2。成纤用 PP 要求等规度 95% 以上，若低于 90% 时纺丝困难。熔点稳定在 164 ~172℃之间。

等规 PP 是典型的热塑性聚合物，工业生产丙纶的纺丝方法一般有两种：一种是熔体纺丝法，它用来纺制长丝和短纤维；另一种是膜裂纺丝法，具有工序简单、消耗定额低、产量高等特点，且对原料要求不高。用于生产丙纶非织造布的方法主要是纺粘法和熔喷法。

（2）性能与应用

1）密度小：聚丙烯纤维的密度为 0.9 ~0.91g/cm^3，是合成纤维中最轻的一种，在所有化学纤维中是最轻的，它比聚酰胺纤维轻 20%，比聚酯纤维轻 30%，

比粘胶纤维轻40%，所以用同样质量的聚丙烯纤维，可比棉花纺出更多的纱，织出更多的织品，并且保温性能好。

2）强度大：聚丙烯纤维强度高（干、湿态下相同），回弹性好，聚丙烯纤维的强度一般为3.08～5.72cN/dtex，居于聚酯纤维和聚酰胺纤维之间；耐磨性仅次于聚酰胺纤维；抗微生物、不霉不蛀；耐化学性优于一般化学纤维。

3）吸湿性小：聚丙烯纤维在一般情况下是不吸收水分的。它的最大吸水量也不超过0.2%。所以其织品不仅易洗易干，而且尺寸稳定，不褶不皱，水湿后强度也不下降。

4）化学稳定性好：在一般情况下，酸碱和有机溶剂对丙纶均无影响。但氯磺酸、浓硝酸等能使聚丙烯纤维膨胀以至溶解。

5）绝缘性能好：聚丙烯纤维电阻率很高（$7\times10^{19}\Omega\cdot cm$），聚丙烯纤维的电绝缘性能也不随温、湿度的变化而改变，所以是很好的绝缘材料，导热系数很小。因此，与其他化学纤维相比，聚丙烯纤维的电绝缘性和保暖性最好。

另外，聚丙烯纤维的耐热性、染色性和耐日晒性能等均差。

聚丙烯纤维可与棉、毛、粘胶纤维混纺用于服装，可制成地毯和装饰织物，工业上可用作渔网、绳索、滤布、人造草坪、造纸用毡和纸的增强材料等。此外，聚丙烯烟用丝束可作为香烟过滤嘴的填料。聚丙烯的非织造布可用于一次性卫生用品。聚丙烯纤维制成土工布，可用于土建和水利工程。用聚丙烯纤维制成的纸张不怕水、不怕折叠、不霉不烂，因此广泛用于军用地图、建筑图样、名片、交通旅游图等。

5. 聚乙烯醇纤维

（1）概述　聚乙烯醇（PVA）纤维是合成纤维的重要品种之一，其常规产品是聚乙烯醇缩甲醛纤维，国外商品名有维尼纶等。因维纶的短纤维外观形状接近棉，具有棉花般的手感，故有“合成棉”之称，而长丝又像蚕丝。国家统一名称叫维纶。

（2）性能与应用

1）密度小：维纶的密度为1.25～1.3g/cm^3，约比棉花轻20%。所以同样厚度的织品，维纶织品比棉织品轻20%左右。

2）强度大：维纶的干态强度一般为3.52～4.05cN/dtex，湿态强度为2.82～4.58cN/dtex。维纶的强度和耐磨性都优于棉，用50/50的棉维混纺织物，其强度比纯棉织物高60%，耐磨性可以提高50%～100%。由于其断裂强度比棉花高，比羊毛更高，因而维纶织品比纯棉或纯毛织品结实耐用。

3）耐磨性好：维纶的耐磨性高于腈纶、羊毛和棉花。维纶织品比同规格的棉织品要高3倍以上，比纯毛织品也高许多倍。

4）吸湿性好：维纶的吸湿性在各种合成纤维中是最大的。在标准状态下，回潮率为5%，在几大合成纤维品种中名列前茅，与棉花（7%）接近。因此，用维纶织成的内衣能吸收汗液，穿用时感觉柔软、舒适，且具有良好的保暖性。

5）化学稳定性好：维纶有较高的化学稳定性，在稀酸、稀碱或有机溶剂中均无影响，但在浓酸、浓碱液中可使其膨胀以至分解。若把维纶长时间浸入海水或埋入土中均无影响。另外，维纶还具有很好的耐日光性，其耐光性比聚酰胺纤维、棉花和粘胶纤维都好。

6）耐热性和吸色性差：维纶在 100℃以上时，会软化、变形以至熔化分解，并且强度降低。维纶织品的染色性能差，不易染成鲜艳的颜色。

7）弹性：维纶的弹性不如聚酯等其他合成纤维，特别是回弹性不高，其织物不够挺括，因而其织品在穿用时易起皱，影响外观。一些合成纤维的回弹率见表 3-3。

表 3-3　几种主要合成纤维的定伸长（3%）回弹率

纤维	涤纶		锦纶		腈纶短纤维	维纶短纤维	氯纶短纤维
	长丝	短纤维	长丝	短纤维			
回弹率（%）	95 ~ 100	90 ~ 95	98 ~ 100	95 ~ 100	90 ~ 95	70 ~ 85	70 ~ 85

另外，维纶的耐水性较差，在湿态下温度超过 110 ~ 115℃就会发生明显的收缩和变形。维纶织物在沸水中放置 3 ~ 4h 后会发生部分溶解。

维纶的最大用途是与棉混纺制成棉混纺布或针织品。随着维纶生产的发展，它在工业、农业、渔业等方面的应用不断扩大，主要用途为塑料及水泥、陶瓷等的增强材料；作为石棉的代用品用于建筑业；制造渔网、渔具和绳缆；用于水产车辆、船舶运输；制成维纶帆布、非织造布滤材以及土工布等。聚乙烯醇纤维在医学上的应用也越来越广泛，如制作抗菌防臭纤维、止血纤维和缝合线以及人工脏器等。

6. 聚氯乙烯纤维

聚氯乙烯纤维是用聚氯乙烯树脂制得的纤维，我国商品名为氯纶。通常以氯乙烯为基本原料制成的纤维统称为含氯纤维。其中主要包括聚氯乙烯纤维、过氯乙烯纤维（过氯纶）、偏二氯乙烯和氯乙烯共聚物纤维（偏氯纶）等。

聚氯乙烯纤维突出的优点是：耐化学腐蚀性、保暖性和难燃性好，其保暖性比棉和羊毛还好，极限氧指数居各种纤维之首（表 3-4）；耐晒、耐磨和弹性都很好；它的吸湿性很小，电绝缘性强；其强度接近棉纤维。缺点是耐热性差，只宜在低于 40 ~ 50℃下使用，沸水收缩率大和染色困难。

表 3-4　各种纤维的极限氧指数值

纤　维	L . O. I	纤　维	L . O. I
腈纶	18. 2	锦纶	20. 1
三醋酯纤维	18. 4	涤纶	20. 6
醋酯纤维	18. 6	羊毛	25. 2
丙纶	18. 6	改性腈纶	26. 7

（续）

纤 维	L.O.I	纤 维	L.O.I
维纶	19.7	氯纶	37.1
粘胶纤维	19.7	偏氯纶	45～48
棉	20.1		

聚氯乙烯纤维的产品有长丝、短纤维以及鬃丝等，但以短纤维和鬃丝为主。可用于制造各种针织品、衣料。由于它具有良好的弹性、保暖性和难燃性，适宜制作毛毯和地毯。工业上用作耐腐蚀的滤布、工作服、防尘口罩等。聚氯乙烯鬃丝主要用于编织窗纱、筛网、绳索等。

7. 聚四氟乙烯纤维

含氟纤维具有独特的综合性能，是目前任何新型纤维都难以替代的材料，其中主要是聚四氟乙烯纤维，其次是四氟乙烯与六氟丙烯共聚物纤维。

聚四氟乙烯纤维是由聚四氟乙烯乳液直接进行纺丝，通过高温烧结而制成，我国的商品名称为氟纶。

聚四氟乙烯纤维既能在较高的温度下使用，也能在很低的温度下使用，长期使用温度范围为 -180～260℃，强度失效温度为310℃，瞬时可耐1000℃以上的高温火焰。其极限氧指数高达95，是高氧环境中最难燃的有机纤维。

聚四氟乙烯纤维有优良的化学稳定性，它的这种性能超过所有其他的天然纤维和化学纤维，是一种优异的耐腐蚀纤维。聚四氟乙烯纤维也是各种化学纤维中耐气候性最优良的一种，在室外曝露15年，其物理性能也未发生明显的变化。

此外，聚四氟乙烯纤维还具有极好的电绝缘性能和抗辐射性能，是理想的高温、高湿下的电气绝缘材料。在较大的负荷和较高温度范围内摩擦因数只有0.01～0.05，并具有良好的非粘着性和极低的吸湿率。

聚四氟乙烯纤维是一种对于尖端科学技术、国防工业以及其他国民经济部门的发展有着重要意义的纤维材料。用这种纤维加工制成的增强塑料，是制作飞机和其他飞行器的结构材料，也可以制作火箭发射台等的屏蔽物，其织物可用于制作宇宙航行服。由于它有极佳的化学稳定性且摩擦因数小，故宜于制作各种耐腐蚀和耐高温的密封函，过滤高温下腐蚀性气体、酸、碱雾滴的过滤袋，腐蚀性物质的传送带、飞机和导弹用的无油轴承等。此外，聚四氟乙烯纤维在医疗上也有它独特的用途，例如用以制作各种人造血管、人造器官，以及非吸收性组织的缝合线等。

8. 聚间苯二甲酰间苯二胺纤维

聚间苯二甲酰间苯二胺（Polymetaphenylene isophthalanide，PMIA）纤维是杜邦公司1967年开始生产的一种间位型芳香族聚酰胺纤维，其商品名为Nomex，我国称之为芳纶1313。

Nornex是由间苯二酰氯和间苯二胺经缩聚反应制得的，前者采用界面缩聚和

干法纺丝，后者采用低温溶液缩聚和湿法纺丝，是目前所有耐高温纤维中产量最大、应用最广的一个品种。

聚间苯二甲酰间苯二胺为难燃材料，极限氧指数为 29 ~ 30，由它制成的纤维、织物和纸在油类树脂或上浆液的存在下不可燃，它还具有良好的耐化学性能。

由于这种纤维具有优良的综合性能、耐磨性好，在高温下不熔融，耐穿透、抗氧性和耐辐射性优良，并耐各种化学试剂，因此它的首要用途是制作易燃易爆环境中的工作服，尽管在价格上比棉织品贵三倍，但寿命却高 6 ~ 12 倍。这类工作服已广泛应用于铁矿、金属、化学、石油及石油化工领域。也可用作赛车服、宇宙服和消防服。它的另一类用途是高温下使用的过滤材料、输送带以及电绝缘材料等，也可用于制作民航客机或某些高级轿车用的装饰织物等。

9. 聚对苯二甲酰对苯二胺纤维

聚对苯二甲酰对苯二胺（PPTA）纤维是芳香族聚酰胺纤维中最有代表性的、在国外产量最大、应用最广的高强度、高模量和耐高温纤维。该纤维最早由美国杜邦公司于 1971 年试制成功，商品名为 Kevlar，国内称为芳纶 1414。

PPTA 纤维具有极好的力学性能，强度可达 22. 07cN/dtex 以上，弹性模量可达 476. 82cN/dtex，约为一般聚酰胺纤维的 9 ~ 10 倍，涤纶的 3 ~ 4 倍；加之它的密度不大，和橡胶有良好的粘着力，被认为是一种比较理想的帘线纤维。此外，这种纤维还具有高韧性和高抗冲击性。

由于芳链的刚性结构，使高聚物具有晶体的本质和高度的尺寸稳定性，玻璃化转变温度也很高（300℃），且制成的纤维不发生高温分解，因此 PPTA 纤维是优秀的耐高温纤维之一。

PPTA 纤维具有优良的物理力学性能，应用范围十分广泛。在工业方面，如轮胎帘子线、高强度绳索、传送带及耐压容器等；军事方面，如防弹衣、防弹头盔、降落伞、装甲板等；航空航天方面，如飞机结构和内部装饰材料、机身、机翼、火箭发动机外壳等；体育器材，如高尔夫球杆、网球拍、钓鱼竿、滑雪板、游艇等。

10. 聚苯并咪唑纤维

聚苯并咪唑（Polybenzimidazoi，PBI）纤维是美国 20 世纪 60 年代中期研制成功的一种耐高温、性能比芳纶 1313 更为优越的新纤维。

PBI 由间苯二甲酸二苯酯和 3，3 – 二氨基联苯胺经熔融缩聚而成。

PBI 纤维是一种金黄色纤维，相对密度 1. 32，强度 433 ~ 512mN/tex，伸长率 19% ~ 24%，初始模量 9. 3 ~ 12. 4N/tex。该纤维具有高度的绝热性及良好的耐热性，分解温度为 660℃，具有好的热稳定性（在 250℃下剩余强度 75%）和较低的热收缩性（在 450℃收缩率 8%），在 550℃下仍保持原有性能，并能经受 600℃的短时高温。在室温至 600℃温度范围内仅收缩 10% 以下。在低氧环境中，PBI 有极佳的稳定性和强度保留率，例如，在 350℃的真空环境中经历 300h，PBI 的力学性能不发生变化。

PBI 的极限氧指数高达 48，在空气中不燃，在氧气中则慢慢地燃烧。手感好，具有优良的含湿率（13%），因此服用性能好，是良好的衣用原料。

PBI 纤维的缺点是耐光性差，在阳光下强度和相对分子质量下降显著。此外，抵抗化学药剂稳定性能差，在 90% 的硫酸中收缩 43% 。

这种纤维目前的主要用途是在宇宙航行和军工等方面，用以制作各种防护服和宇航服等。另外，它也能用于制作专供高速喷气式飞机以及宇宙航行飞船重返地面时用的制动降落伞等。

然而，由于制备 PBI 纤维的成本高、工艺复杂、售价昂贵，限制了它的大规模生产。

11. 超高相对分子质量聚乙烯纤维

在通常条件下，聚乙烯、聚丙烯、聚乙烯醇、聚丙烯腈、脂肪族聚酰胺及聚酯等柔性成纤聚合物在熔融或溶液纺丝成型及后处理过程中，大分子多呈折叠结构，只能制成满足一般要求的化学纤维。如果采用特殊的纺丝及拉伸工艺使折叠的大分子伸直并结晶化，就有可能制成强度和模量较高的纤维。1975 年荷兰 DSM 公司试制出具有优异拉伸性能的超高相对分子质量聚乙烯（UHMWPE）纤维，打破了只能由刚性高分子制取高强、高模纤维的传统局面。这种纤维的强度和模量都超过了 Kevlar 纤维，美国的商品名为 Spectra，日本的商品名为 Dyneemao，以伸直链结晶结构代替常规聚乙烯纤维所具有的沿纤维轴向排列的折叠链结晶区和无定形区的两相结构，是使纤维具有高强高模的技术关键。用 UHMWPE 作为原料是实现结构转变的保证。但是随聚乙烯相对分子质量的提高，熔体粘度剧增，用常规的熔体纺丝工艺制造纤维有困难。为了解决这个问题，人们进行了大量的研究，并开发出许多新的成纤方法，其中有实用价值的方法有两种：一种是超拉伸法和区域拉伸法；另一种是冻胶纺丝 - 超拉伸法。目前，聚乙烯的冻胶纺丝工艺在国外已实现工业化，而且还可用于其他聚合体，如聚乙烯醇等。

UHMWPE 纤维的密度小（约 0.97g/cm^3），其比强度和比模量在有机纤维材料中是最高的；断裂伸长为 3% ~6% ，比碳纤维、PPTA 纤维及钢丝大；冲击性能仅次于聚酰胺 6，而优于聚酯、PPTA 和碳纤维；受到高速运动物体冲击作用时，这种纤维所能吸收的能量是 PPTA 纤维、聚酰胺 6 纤维的 2 倍左右，表明它更适于作为防护材料使用。高强度聚乙烯纤维的钩结强度和结节强度都较高，在弯曲或打结时不会断裂或破损；它的摩擦因数小，耐磨性优于其他产业用纤维，容易进行各种纺织加工。

UHMWPE 纤维有良好的耐紫外线辐照性能，在日光下照射 1000h 后其强度保持率为 70% ，而同样条件下 PPTA 纤维仅为 30% 左右。它还具有优良的耐化学药品性以及不吸水、电磁波透过性好等特点。

UHMWPE 纤维的拉伸性能优异，适于制作各种绳、索、缆等，可作为海洋用纤维材料。由于这种纤维有良好的耐疲劳性、耐磨性以及较高的钩结和打结强度，

可织成各种织物或非织造布，用于制作防弹衣、帆布、防水服或过滤材料、防护材料等；UHMWPE 纤维也是比较理想的增强材料，复合材料可用于头盔、装甲兵器壳体、盾牌、耐压储罐、滑雪板等。

UHMWPE 纤维也存在一些缺点。例如普通聚乙烯纤维的熔点约 134℃，而 UHMWPE 纤维的熔点虽提高 10 ~ 20℃，但仍大大低于其他高性能纤维，限制了它在高温环境下的应用；轴向抗压性能优于 PPTA 纤维而劣于碳纤维；容易发生蠕变以及与热固性树脂体系的粘结性差等。这些不足可以通过化学的或物理的方法加以改进或克服。

12. 聚氨酯弹性纤维

聚氨酯弹性纤维是指聚氨基甲酸酯为主要成分的一种嵌段共聚物制成的纤维，简称氨纶。1958 年由美国杜邦公司实现工业化生产，商品名为 Lycra，意为像橡胶一样的纤维。由于它不仅具有像橡胶丝那样的弹性，而且还具有一般纤维的特征，因此，作为一种新型的纺织纤维受到人们的青睐。

聚氨酯弹性纤维具有线密度低、强度高、弹性及耐热性好、吸湿性较强、密度低和染色性优良等特性，还具有良好的耐气候性、耐挠曲、耐磨和耐一般化学药品性等优点，在针织和机织的织物中得到应用。通常用于制作各种紧身衣、运动衣、游泳衣及各种弹性织物。

13. 碳纤维

碳纤维（Carbon Fibre，CF）是由元素碳组成的纤维状物质，是一种新型的非金属材料。从元素组成看，它不是有机纤维，从制取方法看，它又是经有机纤维固相反应转变而成的纤维状聚合物碳。习惯上将 1000 ~ 2300℃范围内炭化得到的纤维称为碳纤维，而 2300℃以上炭化得到的纤维称为石墨碳纤维，或简称石墨纤维。前者含碳量为 80% ~95%，后者含碳量在 99% 以上。

碳纤维的开发很早，而真正作为有实用价值并工业化生产的碳纤维则出现在 20 世纪 50 年代末期，美国、日本和英国的一些公司相继研制出各种类型和不同性能的碳纤维并投放市场。各国生产的碳纤维基本上都以有机纤维为原丝，通过加热除去碳以外的一切其他元素，并形成一定的结构。从原则上讲，所有天然纤维和化学纤维都能用作生产碳纤维的原丝，但目前工业生产中主要采用聚丙烯腈纤维、沥青纤维或粘胶纤维为原丝。

碳纤维的断裂强度和模量可达 2 ~ 4GPa 和 400 ~ 700GPa，质地强而轻、耐高温、耐腐蚀和耐辐射，还具有自润滑性好，有良好的导电性和导热性以及吸附性强等优点。

碳纤维并不单独使用，它可以多种形式（如长丝、短纤等）与各种基质（热固性树脂、热塑性塑料、金属、陶瓷、玻璃、水泥等）构成复合材料，目前最重要的是碳纤维增强塑料和碳/碳复合材料。碳纤维复合材料是十分有用的结构材料，它不仅质轻、耐高温，而且有很高的拉伸强度和弹性模量，是制造宇宙飞船、火

箭、导弹、高速飞机以及大型客机等不可缺少的组成材料。在交通运输、化工、冶金、建筑等工业部门以及体育器材等方面也都有广泛的应用。表3-5为由碳纤维制得的复合增强材料（CFRP）与其他一些工程材料的部分性能比较。

表3-5 碳纤维复合增强材料与其他工程材料的比较

	钢	铝	玻璃钢（GBP）	碳纤维复合材料（CFRP）	
				Ⅰ型	Ⅱ型
纤维体积分数（%）			60	60	60
相对密度	7.9	2.8	2.0	1.6	1.5
弹性模量/GPa	209.8	70.0	40.0	190	13.0
拉伸强度/GPa	1.0	4.0	11.0	10.0	14.0
比强度	0.126	0.143	0.55	0.625	0.93
比模量	25.56	25.0	20.0	418.7	86.67

第4章　木　　材

4.1　概述

木材具有许多优良性能，如轻质高强，即比强度高，有较高的弹性和韧性，耐冲击和振动，易于加工，保温性好，大部分木材都具有美丽的纹理，装饰性好等。但木材也有缺点，如内部结构不均匀，对电、热的传导极小，易随周围环境湿度变化而改变含水量，引起膨胀或收缩，易腐朽及虫蛀，易燃烧，天然疵病较多等。

4.2　木材的基本知识

4.2.1　木材的分类

1. 按树叶分

木材的树种很多，按树叶的不同，可分为针叶树和阔叶树两大类。

（1）针叶树　树叶细长如针，多为常绿树，树干通直而高大，树木强度较高，体积密度和胀缩变形较小，常含有较多的树脂，耐蚀性较强。纹理平顺，材质均匀，木质较软而易于加工，故又称“软木材”。

（2）阔叶树　树叶宽大，叶脉成网状，大都为落叶树，树干通直部分一般较短，大部分树种的体积密度大，材质较硬，较难加工，故又称“硬木材”。也有少数质地较软的，如桦木、山杨、青杨等。

2. 按加工程度分

为了合理用材，按加工程度和用途的不同，木材可分为原条、原木、板方材等。

（1）原条　指已除去皮、根、树梢的木料，但未按一定尺寸加工成规定的材料。可用于建筑、家具用材等。

（2）原木　指已除去皮、根、树梢的木料，并按一定尺寸加工成规定直径和长度的材料。根据使用情况，分为直接使用的和加工用的两种原木。

（3）半原木　按照直径将原木锯成两半所得的木材。

（4）毛边板　顺着两平行面锯开而留有未锯的锐边的木料。将木料竖着锯开即得此种板材。

（5）整边板　沿平面和边部锯开所得的矩形断面木料，宽度和厚度的比大

于3。

（6）毛边方材 沿两平行面锯切的木料，宽度和厚度之比不大于3。

（7）三面加工的毛边方材 沿三个相互垂直的面锯开所得到的木料。方木的宽度和厚度之比不大于3。

（8）板方材 指按一定尺寸锯解、加工成的板材和方材。板材，是指截面宽度为厚度的3倍或以上者；方材，是指截面宽度不足厚度的3倍者。

（9）板皮 由原木侧面部分得到的木料，其横断面为弓形。

4.2.2 木材的构造

木材属于天然材料，其树种及生长条件的不同，构造特征有显著差别，从而决定着木材的使用性和装饰性。木材的构造可分为宏观和微观两个方面。

1. 木材的宏观构造

木材的宏观构造，是指用肉眼或放大镜所能看到的木材组织。木材由树皮、木质部和髓心等部分组成。首先定义一下木材的各个截面：木材的横切面（横切面指与树干或木纹方向垂直锯割的切面。是垂直于树轴的面），在这个切面上，木材细胞间的相互联系都清楚地反映出来，它是识别木材最重要的部位。径切面（顺着树干方向，通过髓心锯割的切面叫标准的径切面。从横切面上看，凡是平行木射线的切面。或垂直于年轮的切面都叫径切面）在这个切面上，年轮成条状，相互平行。而与木射线相互垂直。通过树轴的纵切面，由径切面而成的板材，收缩小，不易翘曲。适用于地板和乐器用材的共鸣板。弦切面（顺着树干方向，与年轮相切的切面）它是一个年轮的切线，又是年轮的弦线。经切面和弦切面又叫纵切面。这种方法锯割的板材，年轮在板面上成V字形，花纹美观。一般木板多是弦切面。

树皮是树干最外的一层。它的最外层是表皮，表皮里面称为皮层。当表皮衰老时就生出“木拴”层，表层里面是韧皮部，韧皮部包括筛管和韧皮纤维。树皮是识别原木材的主要特征之一。它的厚薄、颜色和外部形态，各种树均不相同。树皮的利用价值很高，在化工、医药、造纸等方面有广泛应用。

形成层是树皮和木质部之间的薄层组织。它是由一层细胞组成，形成胚状，只能在显微镜下才可以看到。形成层的细胞有分裂作用，能够分裂生成新细胞。向外分裂的细胞分出韧皮部，形成树皮。向内分裂的细胞分出新的木质部，构成木材，它是产生木材的源泉。

在树干的横切面上，有一圈圈木质层，这些呈同心圆的圈圈叫年轮。多数树种的年轮，近似圆圈，只有少数树种呈不规则的波浪状。如苦楮栲树、千金榆等。年轮由春材（早材）和夏材（晚材）两部分组成。春材颜色较浅，组织疏松，材质较软；夏材颜色较深，组织致密，材质较硬。相同树种，夏材所占比例越多木材强度越高，年轮密而均匀，材质好。

温带或寒带的树木，一年仅有一度生长，每年形成层向内生长一层，故称为年

轮，热带或亚热带的气候，因四季温差不大，一年之内生长好几圈木质层，这样的圈圈为生长轮，就不能称为年轮。

木材三切面如图 4-1 所示。

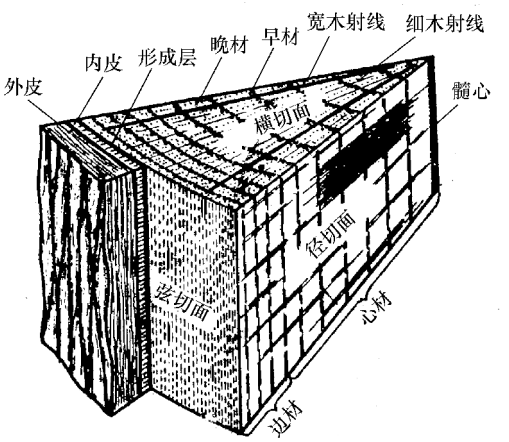


图 4-1　木材三切面

树干中心颜色较深的部分称为心材。心材外围材色较浅的部分，称为边材。各种树种的边材宽窄不同，因而它是鉴别木材的特征之一。

各种树木沿心、边材的区别明显与否，可分显心材和隐心材两大类。显心材类的树种有红松、落叶松、桦木、麻栎等。隐心材类的树种有冷杉、云杉、桦山杨等。

髓心是指树干的中心部分。髓心管是由髓心与初生木质部形成。所谓初生木质部是指树木在第一年生长时所形成的与髓心相邻的木质细胞。髓心一般由很大的薄壁细胞构成。因此，力学性能差，质松软，强度低，易腐朽，易开裂，通常树干腐朽也都从髓心开始。对材质要求高的用材不得带有髓心。

在树面横切面上，从树干中心至树皮之间呈现许多成辐射状的条纹，这些条纹叫做髓线。在木质部中的髓线，称为木射线。在韧皮部里的髓线称为韧皮射线。髓线是由薄壁细胞组成，它在木材生长时可起输送和贮藏养料的作用，但由于髓线细胞间连结很弱，它是木材中较弱而强度低的部位。木材干燥时常沿着木射线发生裂纹，降低使用价值。髓线与周围连结弱，木材干燥时易沿此线开裂。

在木材横切面上有很多大大小小的孔眼，大孔在肉眼下显而易见，小孔在显微镜下才能看到。针叶树材没有导管，用肉眼看不出孔叫无孔材。阔叶树材的导管较大叫有孔材。阔叶树材的导管在横切面呈孔状，叫管孔。

阔叶树种根据其管孔的排列不同通常分为：

（1）环孔材　管孔沿年轮呈环状排列。

（2）散孔材　管孔年轮均匀分布。

就同种木材来说，管孔大的木材强度低，容易开裂。

在某些针叶树中如马尾松、红松、落叶杉等，由分泌细胞围绕而成的特殊孔道，叫做树脂道。树脂道占木材体积0.7%～1%。树脂道除可以帮助识别木材以外，更重要的是采割树脂。当树干损坏时，树脂有保护木质不染菌腐朽的作用。有树脂道的木材不利于涂料装饰，易燃烧。

2. 木材的微观构造

木材的微观构造，是指用显微镜所能观察到的木材组织。在显微镜下，可以看到木材是由无数管状细胞结合而成的，每个细胞都是由细胞壁和细胞腔两个部分组成。细胞壁由若干层细纤维组成，纤维之间有微小的空隙能渗透和吸附水分。针叶树材的显微结构较简单而规则，它由管胞、髓线、树脂道组成，阔叶树材的显微结构较为复杂，主要由导管、木纤维及髓线组成。春材中有粗大导管，沿年轮呈环状排列的称为环孔材。春材、夏材中管孔大小无显著差异，均匀或比较均匀分布的称为散孔材。阔叶树材的髓线发达，它粗大而明显。导管和髓线是鉴别针叶树和阔叶树的主要标志。

树种不同，其纹理、花纹、色泽、气味也各不相同，体现了宏观构造的特征。木材的纹理是指木材内纵向组织的排列情况，分直纹理、斜纹理、扭纹理和乱纹理等。木材的花纹是指纵切面上组织松紧、色泽深浅不同的条纹，它是由年轮、纹理、材色及不同锯切方向等因素决定，可呈现出银光花纹、色素花纹等，充分显示了木材自身具有的天然的装饰性，尤其是髓线发达的硬木，经刨削磨光后，花纹美丽，是一种珍贵的装饰材料。由于树木的种类繁多，木材的构造复杂，掌握识别木材树种的技能是十分必要的。特别是在选用有关材质、树种时，能够做到正确的判断和识别也是非常必要的。

4.3 木材的基本性质

4.3.1 密度和体积密度

（1）密度　由于木材的分子结构基本相同，因此木材的密度比较接近，介于1.3～1.7之间，平均约为1.55g/cm^3。

（2）体积密度　也称容重。指木材在某一含水量时单位体积的重量。干燥木材的体积密度平均约500kg/m^3。

木材的体积密度因树种、树龄、生长条件、部位、孔隙率、含水率不同而不同，含水率是影响木材体积密度的主要因素，通常以含水率为15%时的体积密度作标准，称为标准容重（V_{15}）其容重可用下列经验公式计算：

$$V_{15} = V_w\ [1 + 0.01\ (1 - K_{体})\ (15 - W)]$$

式中　V_w——含水为W时木材的容重（g/cm^3）；

$K_{体}$——木材体积干缩系数；

W——测定时木材的含水率（≥30%）。

表 4-1 为比重 r 与木材强度的关系。

表 4-1 比重 r 与木材强度的关系

类别	抗压强度	抗拉强度	抗弯强度	抗剪强度	抗弯弹性模量
强度/(kg/cm^3)	700r	864r	1010r	134r	135000r

在常用木材中体积密度较大者为 980kg/m^3，较小者为泡桐 280kg/m^3，我国最轻的木材为台湾的二色轻木，体积密度只有 186kg/m^3，最重的木材是广西的蚬木，体积密度高达 1128kg/m^3。一般体积密度低于 400kg/m^3 者为轻，高于 600kg/m^3 为重。

4.3.2 导热性

木材具有较小的体积密度，是一种良好的绝热材料，表现为导热系数较小，原因是它有许多孔隙，在个别树种中，孔隙占木材体积的 80%。

木材的导热性用导热系数表示。木材的导热系数和容重、含水率有密切关系。木材和水的导热性都比空气高，所以木材导热性随着容重或含水率的增加而增高。轻的木材的导热性很小，几乎和石棉相似。

但木材的纹理不同，即各向异性，使得方向不同时，导热系数也有较大差异。就木纹方向来说，顺纹比横纹大 1 ~ 1.5 倍，径向导热比弦向导热大 10% ~ 15%。如松木顺纹纤维测得 $\lambda = 0.3$W/(m · K)，而垂直纤维 $\lambda = 0.17$W/(m · K)。这就是木材细胞的纵向连接比横向更紧实些，以及木射线的作用造成的。

4.3.3 含水率

木材中的水分是以化学结合水、自由水和吸附水三种状态存在的。木材中所含水的质量与木材干燥后质量的百分比值，称为“木材的含水率”。

1）相对含水率与绝对含水率：相对含水率是木材中含水量与当时湿木材重量的百分比。绝对含水率是指木材中含水量与绝对干燥的木材重量的百分比。

$$W\% = (G_{水} - G_0)/G_0$$

式中 W——木材含水量；

$G_{水}$——含水的木材重；

G_0——绝对干燥的木材重（木材置于温度 100 ~ 105℃ 环境中烘至恒重时的重量）。

2）饱和含水率：木材中的水分可分为细胞壁中的吸附水和细胞腔与细胞间隙中的自由水两个部分，当木材细胞壁中的吸附水达到饱和，而细胞腔与细胞间隙中无自由水时的含水率，即木材中仅含剩余吸附水时，称为“纤维饱和点”（FSP Fi-

ber Saturation Point)。纤维饱和点因树种而异，一般为25% ~35%，平均为30%，它是含水率是否影响强度和胀缩性能的临界点。这时木材的相对含水率称为饱和含水率。

3）平衡含水率：如果潮湿木材长时间处于一定温度和湿度的空气中，木材便会干燥，达到相对恒定的含水率，这时木材的含水率，称为“平衡含水率”。平衡含水率随空气湿度的变大和温度的变低而增大，反之，则减少。

木材的含水率是影响木材性质最主要的因素。一般根据木材含水率的不同，将木材分为干木材（含水率不超过18%）、半干木材（含水率18% ~23%）和湿木材（含水率23%以上）。空气风干木材含水率多为15% ~20%，湿干木材含水率为8% ~13%。

木材的含水率见表4-2。

表4-2 木材的含水率

用途	含水率（%）			用途	含水率（%）		
	最小	最大	正常		最小	最大	正常
飞机	6	10	6	家具	6	10	8
汽车	10	18	12	乐器	3	6	5
铅笔	3	8	6	玩具	6	7	6
运动器材	8	12	10	木箱	5	9	7
木地板	6	10	6	桩木	气干		

4.3.4 吸湿性

木材具有较强的吸湿性。湿材在干燥过程中，最先跑出的是细胞腔和细胞间隙的毛细管水。当毛细管水快蒸发完了，细胞壁上的水还处在饱和状态，这时木材的含水状态，叫纤维饱和点，或者说干材在吸湿过程中。在细胞腔还没有出现水分，只有细胞壁饱含水分时，也就是纤维饱和点，这时的木材含水率，叫纤维饱和点含水率。纤维饱和点含水率的多少，因树种而不同，一般在23% ~31%之间。

纤维饱和点含水率具有重要意义。当含水率在纤维饱和点以上时，水分的增减，只是细胞腔中的水分变多或变少，细胞壁的情况不变。在这种条件下，对木材重量有影响，但对材性没有影响，木材的强度值是一个常数，即不因含水率的多少而增减。当含水率在纤维饱和点以下时，因为含水率减低，细胞壁就会收缩，木材强度随之增加；相反地，含水率增大，细胞壁就会疏松，木材强度也会减低。因此，纤维饱和点是材性变化的转折点。

木材从空气中吸收水湿的性能，叫木材吸湿性。木材放在空气中，逐渐蒸发水分，一直达到和周围空气温度相平衡状态，这时木材含水率，叫平衡含水率。

各地木材平衡含水率不同，随各地区的温度和湿度而变化。木材的平衡含水率

在我国北方大约 12%，南方大约 18%，长江流域大约 15% 左右。木材的平衡含水率在实际生产上有一定的意义，如在上海制造的家具要干燥到标准限度，以适应使用地区的平衡含水率。否则，这些成品运到南方或北方会变形。所以，木材的吸湿性对木材的性能，特别是木材的干缩湿胀影响很大，因此，木材在使用时其含水率应接近于平衡含水率或稍低于平衡含水率。木材的吸湿率是以绝干木材吸湿后增加重量与原来绝干时的重量的百分比表示。常用木材的吸湿率在空气温度（23 ± 1)℃，湿度 92% 时，为 16% ~24%。

4.3.5　湿胀与干缩

当木材从潮湿状态干燥至纤维饱和点时，其尺寸并不改变。当干燥至纤维饱和点以下时，细胞壁中的吸附水开始蒸发，木材发生收缩，叫干缩；反之，干燥木材吸湿后，将发生膨胀，直到含水率达到纤维饱和点为止，此后木材含水率继续增大，也不再膨胀，叫湿胀。由于木材构造的不均匀性，即使同一块木材也有纵向和横向的区别，横向又有径向、弦向之分(图 4-2)。

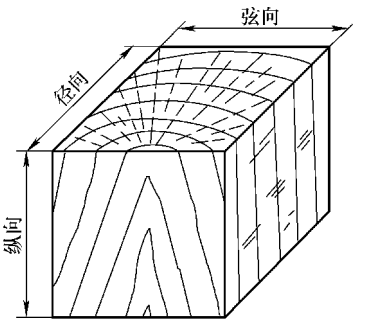


图 4-2　木纹方向

木材的纵向干缩最小，为 0.1% ~0.35%，可以忽略不计。在横向中弦向干缩大，为 6% ~12%，径向小，一般径向干缩为弦向的 1/3 ~1/2，为3% ~6%，因此，湿材干燥后，其截面尺寸和形状，都会发生明显的变化，干缩对木材的使用有很大影响，它会使木材产生裂缝或翘曲变形，以至引起木结构的结合松弛，装修部件破坏等。木材的干缩和湿胀，并不是在任何时候都产生，而是在纤维饱和点以下，水分的减少，木材逐渐收缩，且含水率越低，收缩越多，一直到含水率减低到零，收缩达最大，不再收缩，体积最小；相反地，木材吸湿水分增加，体积逐渐膨胀，一直到纤维饱和点，才不再膨胀，体积最大。过了这点，即使水分再增加，木材尺寸、体积也不再变，只能引起木材重量增加。

干缩率以木材干燥后尺寸的减少值与绝干时尺寸的百分比来表示。干缩率常分为线干缩率、面干缩率和体干缩率三种。木材的干缩特性用干缩系数来衡量。

木材线干缩率：　　$L_{线} = (L_h - L_0/L_0) \times 100\%$

式中　$L_{线}$——木材由含水量为 h 到绝对干燥时木材线干缩百分率；

L_h——含水量为 h 时木材的长度；

L_0——绝对干燥时，木材的长度。

木材面干缩率：　　$Q_{面} = (Q_h - Q_0/Q_0) \times 100\%$

木材体干缩率：　　$V_{体} = (V_h - V_0/V_0) \times 100\%$

式中　Q_h——木材含水量 h 时的面积；

Q_0——木材绝对干燥时的面积；

V_h——木材含水量 h 时的体积；

V_0——木材绝对干燥时的体积。

木材含水率每增加1%时，其干缩率变化数值称为干缩系数。木材的干缩系数用下式表示：

木材线干缩系数：$K_{线} = (L_{线}/W) \times 100\%$

木材面干缩系数：$K_{面} = (Q_{面}/W) \times 100\%$

木材体干缩系数：$K_{体} = (V_{体}/W) \times 100\%$

式中 W——木材在FSP以下时的吸附含水量，其单位用饱和含水率的百分数表示。

表4-3为常用木材的最大干缩率。

表4-3 常用木材的最大干缩率

指标 / 树种	最大干缩率（%）			
	体积干缩率	弦向干缩率	径向干缩率	弦向干缩率为径向干缩率的倍数
松	12.5	8.1	4.4	1.85
云杉	14.1	9.3	4.9	1.97
常叶松	15.1	10.4	5.3	1.96
水曲柳	—	—	4.8	1.69
栎	12.8	8.4	4.7	1.77
水青桐	15.3	10.8	4.9	2.22

木材湿胀同干缩一样，纵向湿胀最小，弦向最大，径向次之。湿胀的速度是均匀的，开始快一些，逐渐减慢，接近纤维饱和点时最小。湿胀也是木材利用的不良性质，因为它不仅改变木材尺寸，而且降低木材强度。但是，在某些方面，又是它的优点。如木船需要木材湿胀的性能，才不至于裂缝漏水。

木材的湿胀率是以木材吸湿后的尺寸增加值与绝干时尺寸的百分比来表示。木材的干缩和湿胀过程恰恰相反，在理论上它们的胀缩变动应该是相同的。但是，木材制品在干缩过程中会产生物理化学和力学性质的变化，使木材细胞变形。湿胀时虽然吸收了原来失去的水分，但常常不能恢复到原来的尺寸。

木材干燥后，由于收缩不均匀，径、弦向干缩的差异，使木材原来形状改变，这叫变形（图4-3）。这些现象有的是板面保持平直，只是横切面形状改变。如果板面不在一平面上，引起纵向形状的改变，叫翘曲（图4-4）。如木材纹理交错，干缩后常出现局部弯曲，螺旋纹理干缩后，出现扭曲；应力木干缩后，常出现弓形反翘或边弯，也会发生裂隙，甚至拦腰折断，形成严重缺陷。

木材产生反翘的原因，除应力木外，堆积木材时，一头离衬木过长，或衬木间

距过大，都会引起弓形反翘。防止反翘的有效办法主要是合理堆积木材。

木材在不均匀干燥过程中发生的裂隙，叫开裂（图 4-5）。如裂开的缝隙是沿着木射线，叫径裂，如栎木类；裂缝沿着年轮，叫轮裂，如榆木类。径裂的原因是木射线和木纤维之间的结合比较脆弱，木材弦向收缩大，往往沿木射线破裂。

轮裂的原因很多，有的是由于早、晚材的差异；有的是在树木生长时，树干受风的摇晃；有的是树木伐倒时，树干摔震所引起；有的是干缩时产生不均匀的收缩等。

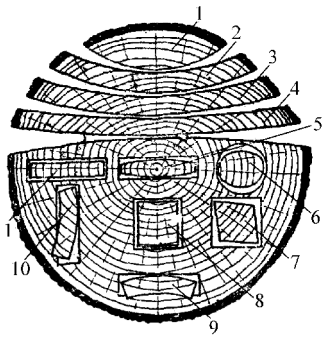


图 4-3　变形

1—弓形缩后成橄榄核状　2、3、4—瓦形反翘
5—两头缩小成纺锤形　6—圆形缩后成椭圆形
7—方形缩后成菱形　8—正方形缩后成矩形
9—长方形缩后成瓦形　10—长方形缩后成不规则
11—长方形缩后成矩形

木材的两头发生开裂，从表面向内扩展，叫端裂；也有从髓心向外延伸，叫心裂；裂纹发生在板材或原木表面，叫表面裂。端裂是由于木材端头的水分蒸发过快（端面约为侧面的 7 ~ 13 倍），所以通常在端头开裂。

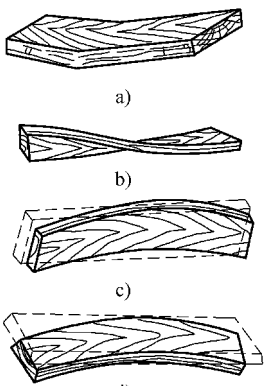


图 4-4　翘曲

a）局部弯曲　b）扭曲
c）弓形反翘　d）边弯

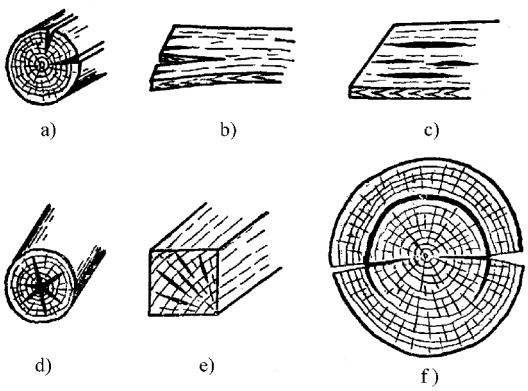


图 4-5　开裂

a）、b）端裂　c）表面裂
d）心裂　e）蜂窝裂　f）轮裂

在木材干燥时，由于不均匀的收缩产生上述有形的缺陷，也有时产生无形的缺陷——内应力，只有把板材锯开才能发现，通常用内应力试验片检验。在距板材端头 0. 5m 处截取试验片（图 4-6）。如齿片保持平直，表示没有应力；如向外分开，表示外层有拉伸应力，内层有压缩应力；如向内弯曲合拢在一起，表示外有压缩应

力，内层有拉伸应力。

木材内应力小于木材分子的结合力，如果存在于木材内部，木材锯开后会向内弯曲；如内应力大于木材分子的结合力，则木材的内部发生裂隙，叫蜂窝裂。产生内应力的原因主要是不合理干燥。如要避免内应力的发生，必须按树种、断面尺寸，进行合理的干燥处理。

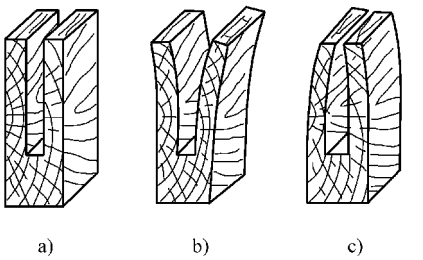


图4-6 内应力试验片

a）没有内应力 b）向外弯曲 c）向内弯曲

木材干缩的原因，是由于木材干燥向外蒸发水分时，细胞壁上的纤丝之间、微纤丝之间的吸着水减少，即水层减薄，则纤丝、微纤丝间距离都相应的靠拢，以致细胞壁变薄，细胞直径也随之减小，从而导致木材尺寸干缩。相反地，木材湿胀吸收水分，是由于细胞壁汲取吸着水而膨胀，逐渐引起木材湿胀。

减少木材干缩与湿胀的方法，不在乎是利用径切板；用细木条胶接成合木，象镶嵌地板采取狭木块镶拼以减少变形和开裂；利用胶合板，由于它纹理纵横交错，互相制约，可减少胀缩性；其他还有木材油漆、干燥等。

了解木材这一特性，以便在木材加工生产中，如何掌握与理解在制材、胶合板制造时考虑单板等的余量，以防止木材干缩后尺寸减小，造成短缺尺寸的毛病。

4.3.6 声学和光学性能

利用木材的声学性质，可以制造各种乐器。民族乐器中的木鱼、木邦、云板、三弦、月琴、琵琶等很多乐器，几乎全是木材做的。就是西洋乐器中的钢琴、风琴、小提琴等离开木材，同样无法成琴。在木材中云杉、泡桐是较好的共鸣材料。钢琴、风琴的音板和小提琴的面板用云杉；小提琴的背板、边板、琴码用槭木，零件用乌木，弓杆用苏木；三弦、琵琶的面板用泡桐，月琴、琵琶的边板用鹅掌柴。

用木材做乐器，是因为木材是由管状细胞组成，具有很好的扩音共振特性。

做乐器的木材，要求年轮均匀，树质致密，纹理通直。如云杉做小提琴面板，最适宜的年轮宽度为3mm，并要均匀，每相邻2cm的年轮数目相差不得超过30%。此外，还要求能很好地传播高频率的声音而不变调，周围部分木材和靠近髓心部分的结构没有差异，声音共振强度也无强弱之分，保证声学效果最好。

木材中有许多空隙，空隙中含有空气，空气可以传播声音，各种木材的传声性强弱各不相同。有的树种传声性能强，有的弱。同一树种含水率多少，材质松密程度和有无缺陷，对传声性能也有很大差异。

木材有很好的传声性能。但是，隔音性能就不好了，同样厚度的墙壁，从隔音性能上说，木材不如其他建筑材料。用木材建筑房屋，尤其是楼板、电话室、剧

院，就需要解决隔音问题。

木材的透光性很差，不能透过普通光线，只有 X 光才能透过。在木材加工中，可以利用 X 光检查木材中有无节疤、虫孔、裂纹、腐朽，以及含在木材中的金属(如铁钉等)，还可以测定防腐剂透入木材的深度。

紫外线用在医疗上杀菌消毒，同样也可用来杀死木材的病菌，给木材消毒，但只限木材表面。还可以根据紫外线透射时发生不同的光色，用于鉴别木材和检查各种物质浸注的程度和深度。

红外线能被木材吸收转变为热能，可用以干燥和杀菌。在木材加工中，由于它的透入深度较浅，干材最大透入深度约 2mm，湿材则更小。所以，主要用于干燥涂料表面，但也有用于干燥薄板。

4.3.7 导电性

木材的导电性很小，全干材几乎是电的绝缘体。电流通过木材阻力的大小，主要是水分的多少。根据这个道理就可用来测定木材含水率。木材中水分在纤维饱和点以下时，水分增加，电阻减少，水分增加到纤维饱和点时，电阻最小。过了纤维饱和点，水分再增加时，电阻降低比较缓和；相反地，水分在纤维饱和点以下，水分减少，电阻增加，到全干材时，它是绝缘体。因此，可以用电测定含水率，它的含水率范围一般为 5% ~33%。

温度对木材导电性影响很大，温度增加，木材的电阻降低。水分减少，电阻增加。

木材的顺纹理方向的电阻，比横纹方向小，而横纹中弦向又比径向小。容重大者电阻小，相反地，容重小的，则电阻大。

有时为增加木材的导电性，浸注金属盐类就可以降低电阻；也有为增加木材绝缘性，浸注石蜡、橡胶、树脂，这样不仅增加木材绝缘性，又可减少木材吸湿性。

上述事例都是低频电作用于木材的情况，当高频电作用于木材时，木材的电阻则变得甚微。因此，近代木材干燥工艺利用在高频电流电场中干燥。利用高频电干燥木材，比普通窑干法快十倍至百倍。因为在高频处理木材时，由于振荡运动使木材分子极化而发生热，热从木材内部形成，而不像其他干燥方法热从材料外部传入，且沿着全厚度同时热透。因此，水分在内部移动较易，由内而外的含水率梯度较小；同时因木材很快热透，产生由内到外的梯度，显著缩短干燥时间，减少发生内应力、开裂、变形等缺陷，干燥质量提高。若较强的电流，成本高，故只限于少数木材工业应用。

4.3.8 强度

木材的强度，主要有抗压强度、抗拉强度、抗弯强度和抗剪强度。并且又有顺纹与横纹之分。每一种强度在不同的纹理方向上均不相同，木材的顺纹强度与横纹

强度差别很大。

（1）抗压强度 木材在许多情况下用于承受压力。常见的有支柱、桩木、坑木等。根据受力方向与木纹的关系，可将木材的抗压强度分为顺纹和横纹抗压强度（图4-7）。横纹抗压强度又分为径向和弦向抗压强度。

木材顺纹抗压强度极限大且较稳定，是木材使用的主要形式，常用的木材顺纹抗压强度极限为30～70MPa。顺纹抗压试件的破坏，主要由于细胞壁被压，失去稳定性而弯曲，使木质纤维挠曲甚至折断。硬质或干燥的试件，在弦切面上破坏呈一定的倾斜度，一般是略大于45°倾斜角的斜线，在径切面上呈水平的波纹状。软质或潮湿的试件破坏时常在端部被压皱并向侧面突出。

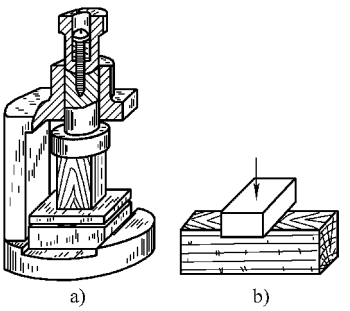


图4-7 压力

a）顺纹压力 b）横纹局部受压

木材横纹抗压强度极限远小于顺纹抗压强度极限。针叶树的顺纹抗压强度极限均为横纹的10～15倍，而弦向抗压强度极限约为径向的1.5倍。阔叶树的顺纹抗压强度极限约为横纹的3～7倍。具有粗大髓线的树种（麻栎、青冈等）径向为弦向的1.5倍。其他树种并无显著区别。在实际使用中，木材横纹压力分局部受压和全部受压。如枕木、门槛是局部受压，垫木是全部受压。在受压时，当应力与变形成正比例，其单位面积所受的荷重，叫公定极限强度。木材具有可塑性，如施力超过比例界限，木材会压扁，仍可承受外力，不致破坏。因此，木材横纹受压仅有公定极限强度。

（2）抗拉强度 木材的拉力（图4-8），与木材纹理平行的拉力，叫顺纹拉力；与纹理垂直的，叫横纹拉力。横纹拉力又有径向和弦向的区别。木材顺纹抗拉强度远远大于横纹。如木材顺纹抗拉强度较抗压强度大2～3倍，通常可达100～150MPa。其原因是细胞成纵向上下错综排列。大多数树种径向大于弦向，尤以具有宽木射线的树种为显著，这是由于木射线的附加强度。由于抗拉制品端部接合处受到拉力时，常先破坏于横纹受压或剪切，因而目前尚无法充分利用木材的顺纹抗拉强度。

木材横纹抗拉强度极小，约为顺纹抗拉强度的1/20～1/40。所以木材通常不用作承担横纹受拉的制品。

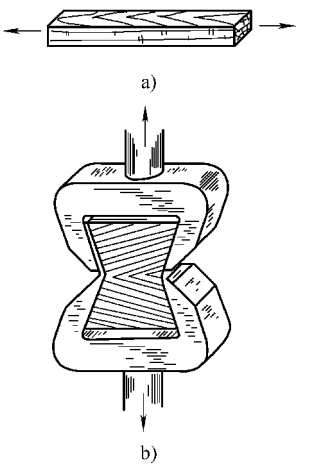


图4-8 拉力

a）顺纹拉力 b）横纹拉力

（3）静力抗弯强度 木材使用在弯曲强度

（静曲）（图 4-9）的地方很多。常见于横梁、桥梁、车轴等。木材具有优良的静力抗弯强度。一般木材的静力抗弯强度极限为 50 ~ 110MPa，约为顺纹抗压强度极限的 1. 5 ~ 2. 0 倍。

当木质制品承受抗弯静力时，由于其抗拉强度极限大于抗压强度极限，制品的受压区域首先发生皱折，然后在拉力区折裂，所以静力弯曲破坏状况，可以用于判断木材品质的优劣。品质高的木材，其折断面呈纤维状犬牙交错，破坏过程的时间较长，常发出声响——咯吱、咯吱，好像是报警器，预告倒塌的危险来临。品质低的或腐朽的木材，其破坏面几乎是平整的脆断，破坏过程的时间短，突然折断，不会有预告声。

（4）冲击弯曲强度　外力突然冲击于木材，使木材弯曲折断，叫冲击弯曲强度（图 4-10）。它是衡量木材坚韧或脆弱的指标，木材是很好的抗冲击弯曲的材料，常用作承受横向冲击载荷的制品。凡春材与夏材区别明显的树种，其径向冲击弯曲强度比弦向高。如落叶松高 50% 、云杉高 35% 、水曲柳高 20% 。阔叶树中的散孔材和针叶材，其两个方向的冲击弯曲强度无甚差别。一般阔叶树的横向冲击弯曲强度比针叶树大 0. 5 ~ 2. 0 倍。木材经常受到冲击荷重的有双杠、棒球柄、船桨等。

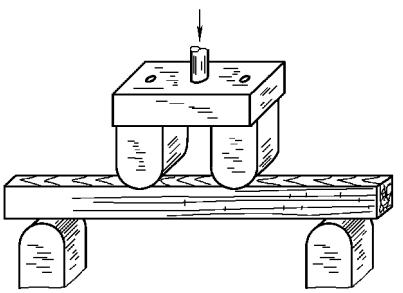


图 4-9　弯曲强度（静曲）

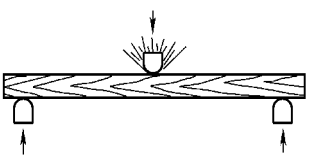


图 4-10　冲击弯曲强度

（5）抗剪强度　外力作用于木材，使其一部分脱离邻近部分而滑走时，在滑动面上单位面积所受最大外力，叫抗剪强度。木材抗剪强度有顺纹剪切、横纹剪切和剪断三种形式（图 4-11）。木纹对木材的抗剪强度有极大的影响：顺纹抗剪强度极限最小，并随剪切面与年轮夹角的大小而改变。一般树种顺纹抗剪强度受年轮方向影响不大，而具有粗大髓线的树木，则弦向的抗剪强度较径向的大 10% ~ 30% 。顺纹抗剪强度极限一般为 4 ~ 15MPa，约为抗压强度极限的 15% ~ 25% 。

木材顺纹剪切，常见于屋架中的椽架斜梁和横梁相连接处，两块木板用螺栓固定，受拉力时，在螺栓部位易发生顺纹剪切。在阔叶材中，弦面抗剪强度大于径面 10% ~ 30% 。其原因是木射线的附加作用，木射线越多，其差异越显著，而针叶材却没有显著规律。

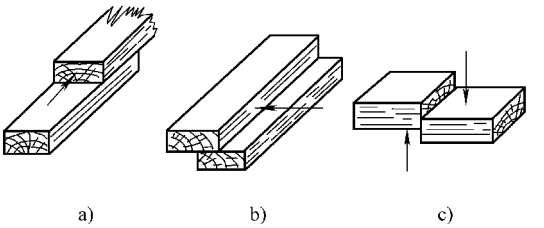


图4-11 剪力

a）顺纹剪切 b）横纹剪切 c）剪断

木材在受剪区域有节子、斜纹理，其顺纹抗剪强度显著增加。而横纹抗弯破坏的剪切面多与木材纤维平行，其强度极限远较顺纹为高，一般为3～7倍。但在实际使用中，由于制品先被横纹受压所破坏，所以利用价值不大。

木材抗剪断强度比横纹局部抗压强度大，在应用中很难遇到净切断，因为受切断作用的木材结构经常是由于严重受到局部挤压而破坏。

木材的横纹切断强度极限远远高于横纹抗剪强度极限，但实际上很难充分利用。

（6）木材硬度 用木材的抗凹能力衡量。硬度（图4-12）大小与木材切削、磨损都有密切关系，硬度大的木材耐磨损，不易刨切。锯切坚硬的木材，必须选用适宜的齿形和锯路。

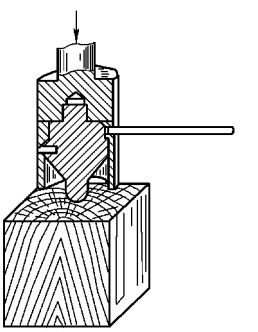


图4-12 硬度

木材的端面、径面和弦面的硬度各不相同。一般是端面较侧面为高，如针叶树横切面的硬度较纵切面硬度约大35%，较阔叶树约大25%。一般树种径切面和弦切面的硬度大致相同，但具有粗大髓线的树种如麻栎、青冈栎木材其弦切面的硬度大5%～10%。

容重对硬度有很大影响：容重越大，木材硬度也越高。

某些用材，如地板、滑雪板、木地板，则应选用黄檀、栎木、蚬木等硬度大、耐磨损的木材。有些构件，如手表或其他精密仪表的抛光，所用木质抛光盘，宜选用材质致密、均匀，硬度适中的梨树、水丝梨等。

（7）弹性模量 木材的弹性模量较金属材料低，并与纹向有关，这是木制品容易变形的主要原因之一。木材的抗拉、抗压弹性模量（E），顺纹比横纹大7～30倍，抗剪弹性模量（G）约为E的1/10～1/3，一般树种的弹性模量E介于10000～15000MPa之间。

木材各种强度的关系见表4-4。

表 4-4 木材各种强度的关系

抗 压/MPa		抗 拉/MPa		抗 弯	抗剪	
顺纹	横纹	顺纹	横纹		顺纹	横纹切断
100	10 ~ 20	200 ~ 300	6 ~ 20	150 ~ 200	15 ~ 20	50 ~ 100

常用阔叶树的顺纹抗压强度为 49 ~ 56MPa，常用针叶树的顺纹抗压强度为 33 ~ 40MPa。

综上所述，木材各种强度的分析证明木材是各向异性材料。同时，木材力学性质变化多端，不但因树种而异，而且同一树种因产地不同，它的力学性质也不同。就是同一树种、生长在同一地区，又受生长条件的影响；还有同一棵树，树干的上下、内外，因树木生长时期的不同，也影响它的力学性质的变异。此外，还受木材构造、木材缺陷、容重、含水率等的影响。

木材性质很复杂，它有一些特殊性能，但也存在一些缺点。在选用木材时，应充分利用它的优点，控制或改变它的缺点，以满足人们的需要。

木材各种极限强度的数值不能直接用作木构件计算的根据，而必须考虑安全系数。由于木材存在缺陷和水分的影响变化很大，所以规定的安全系数要比其他材料高一些，在我国木结构的安全系数一般为 3. 5 ~ 6。一般在家具制造中，对缩小零件规格总觉得不放心，但在实际中家具由于零件太小，而造成损坏的情形较少，故在结构设计时不宜过分强调要求零件尺寸过大，尺寸过大木制品笨重，还浪费木材。所以，除适当考虑木材容许应力外，要注意木材节约，使制品轻巧、美观、耐用。

4. 4 木材的工艺性质

木材在采伐和造材方面较其他材料的炼制方便得多。而且木材容易切削加工，只需使用简单工具，利用榫、胶、钉或与金属元件相连接的方法，即可制成精细的制品。如用木工机械加工，更能又快又好地制得制品。一般木材具有以下主要工艺性质特点。

（1）握钉力　或称持钉力和裹钉力，是木材优良的工艺性质，因此常用钉、榫等方法连接成木制品。木材握钉力是因木材纤维为钉子所挤压或切断，使木材对钉子产生压力的结果。

木材纤维的方向对握钉力有重要作用，平行纤维方向的握钉力约小于垂直方向的 25%，弦向和径向的握钉力则相差不大。此外，握钉力还随树种、容重和含水率而变。通常阔叶树比针叶树的握钉力大，紧密、干燥和容重较大的木材比松软、潮湿和容重小的握钉力高。钉子尺寸、种类也影响木材的握钉力，如木材对大钉的握钉力大于小钉，方钉大于圆钉，螺丝钉大于普通钉。

（2）抗劈裂性 木材顺纹容易劈裂，是木材的特性，衡量木材的抗劈裂性，通常是以单位长度能承担的最大静力劈裂载荷为依据。

木材的抗劈裂性，对握钉力有较大的影响，还对木材砍劈加工带来困难。一般针叶树的抗劈裂性较阔叶树小，针叶树弦向的抗劈裂性比径向小，阔叶树则由于髓线比较发达，则径向比弦向小，尤其是具有粗大髓线的木材，这种差别更加明显。

（3）弯曲能力 木材的弯曲能力是制造弯曲和弧形木质制品的主要依据。木材的弯曲能力主要决定于木材的塑性，以阔叶树的环孔材塑性最好，如栎、柳、榆、水曲柳、山毛榉等树种的弯曲能力最高；散孔材次之，针叶树最差，如红松、白松的弯曲能力最差。

在同一树种中，树龄小的弯曲能力比老树好，具有木节、斜纹、裂纹和腐朽的木材都没有好的弯曲能力。

木材的吸附水增多时，纤维变软而易弯，干燥后即硬化定型，或加高环境温度以增大纤维的塑性，进行弯曲成型，经冷却后硬化定型。

通常弯制木材前，常增加其含水率，使其达到25% ~30%，加热到90 ~140℃，然后进行弯曲。增加木材的含水率和温度，可用水煮法或蒸汽处理，但须通过试验以决定处理时间。

4.5 木材的缺陷

所有木材不都是十全十美的，常常在各种外界因子的影响下，产生多种多样的缺陷。有的是树木生长发育不正常产生的；有的是树木生理正常现象，如节子等，叫树木本身的缺陷；也有的是受到病、虫的侵蚀，引起材质的变化，叫寄生性缺陷；还有在制材加工中，引起的奇形怪状，叫加工中的缺陷。木材的缺陷会使材质受到影响，降低使用价值。有些有缺陷的木材，通过合理利用，可以变劣材为好材，仍能够做到物尽其用。

4.5.1 树木本身的缺陷

属于树木本身缺陷的有节子、树干形状、木材构造和不正常沉积物。

（1）节子 树干上的枝条在树干中生着的断面，称为节子，又叫木节、节疤。树木从一棵幼苗到成材，不断地从髓心生出小枝，树干逐渐加粗，把枝条包藏起来，在那里就形成节子。它呈一个圆锥形，尖端朝向髓心，从中心逐渐向外扩大。靠近节子附近的年轮被挤弯曲，破坏了木材纹理通直。

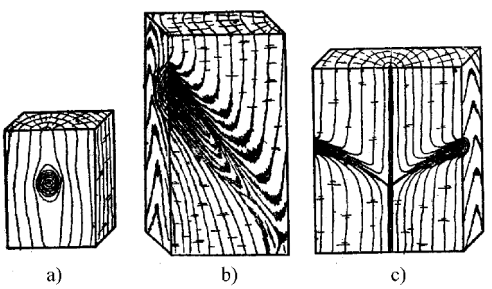


图4-13 节子的断面形状

a）圆形节 b）条状节 c）掌状节

节子是木材中最主要的缺陷之一，它的形状、材质和分布情况是多种多样的。按断面形状分，有圆形节、条状节、掌状节三种（图 4-13）。圆形节或椭圆形节是垂直枝条锯切的断面，见于圆材表面或板材的弦切面。条状节是平行枝条锯切而成，见于板材的径切面。掌状节是针叶材的轮生节，经锯解后在径切面呈对称形状。

节子按其质地及其与周围木材的粘结程度，可分为以下几种（图 4-14）：

活节：节子与周围木材全部紧密相连，质地坚硬，构造正常，没有任何腐朽特征，对木材使用上影响较小。

死节：是树木的枯枝形成，节子与周围木材部分脱离或完全脱离。死节按材质分，坚硬的叫死硬节，干枯后容易脱落，又叫脱落节；材质松软变质，但周围木材健全，叫松软节；如节子已腐朽，但没有透入树干内部，叫腐朽节；有的节子已腐朽，并连同周围材质也腐朽，叫漏节。它的腐朽已深入树干内部，和树干的内部腐朽相连。因此，常成为树干内部腐朽的外部特征。死节在板材中往往脱落而形成空洞。

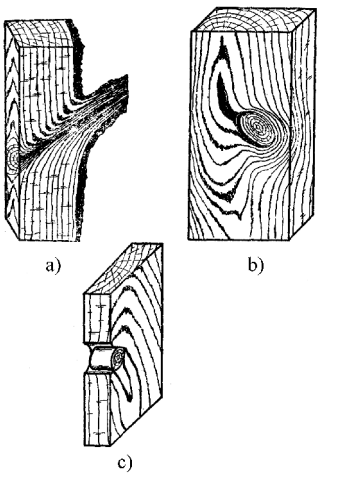


图 4-14　节子

a）活节　b）死节　c）脱落节

岔节：它的木纹在木材表面形成一长条形或者是与主要木纹成很小角度的细长椭圆形，全部贯穿或几乎全部贯穿于表面。由于岔节在板方材中割断了周围的纤维，故这种木料不能做受拉或受弯构件用。岔节是由树木的大枝杈形成。

按节子的分布，有散生和轮生两种：前一种在阔叶材上单一散生，后一种在某些针叶材上轮状排列。它在树干中的分布规律（图 4-15）为根部、中部、梢部三个区域，在根部节子隐生在内部，有死节、活节，而在边材和部分心材为无节区；中部是活节、死节混合区；梢部是活节区。

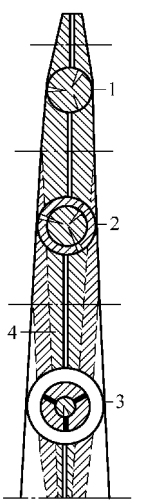


图 4-15　节子在树干中的分布

1—活节区　2—死节区

3—无节区　4—髓心

节子会给加工带来许多问题。如锯材时遇到节疤，进料的速度就得放慢些，不然的话，会损坏锯齿或锯条。在旋刨加工中，使刀具很快变钝，或打坏刀口。节子使局部木材变成斜纹，加工后材面不光滑，易起毛刺或劈渣的现象，影响成品外观。此外，节子还破坏木材均匀性，降低木材强度，如在横梁弯曲时的受拉面。但也有有利条件，如活节对横纹压力、顺纹剪力不但不会降低，反而会增加

强度。在直接使用原木和枕木中，对活节的限制放宽要求，是否列为缺陷要看它所在部位而定。

节子是树木生长不可避免的，但采取措施，可以减少或避免节子的形成。如在造林抚育中，进行合理修枝，使林木提早郁闭，减少枝条。加强抚育管理，可以促使树干成为无节良材。在制材时采取缺点集中，合理下锯。在胶合板、细木工生产中，可采用挖补办法，提高产品质量。

（2）变色和腐朽　木材受两类侵蚀后，其正常颜色发生变化，称为变色。最常见的变色为青皮和红斑两种。青皮是木材外部受青霉菌的作用，使边材部分呈青蓝色或青灰色。有青皮的木材，其强度并不降低。红斑是菌类侵入木材后，在原木断面上且各种形状的红褐色斑点，在成材纵断面上为条带状，对木材的强度影响不大。

木材受腐朽菌的侵蚀后，不但颜色和构造发生改变，同时变得松软、易碎，最后变成一种干的或湿的软块（呈筛孔状、粉末状等），此种状态称为腐朽。按腐朽在树干上分布的部位不同，分为外部腐朽和内部腐朽两种。外部腐朽（边材腐朽）分布在树干的外围，大多是由于树木伐倒后因保管不善，堆积不良而引起的。内部腐朽（心材腐朽）分布在树干的内部，大多是因腐朽菌通过树干的外伤、枯枝、断枝或腐朽节等侵入木材内部而形成的。

（3）虫害　大多数是新伐木材由于保管不良，遭受昆虫的蛀蚀而造成的损伤。根据蛀蚀程度不同，虫眼可分为表皮虫沟（蛀蚀木材深度不足1cm）、小虫眼（虫孔的最小直径不足3mm）及大虫眼（虫孔的最小直径大于3mm），一般对表皮虫沟、小虫眼均不计算，大虫眼要按材质等级，计算其最严重一米内的个数。有些木材内部还残留有害虫的活体或虫卵，对这些木材在加工前，应该用药物进行熏蒸处理，以杀死其中的害虫或虫卵。

（4）裂纹　在树木生长期间或伐倒后，由于受外力或温度和湿度变化的影响，使木材纤维之间发生脱离的现象，称为裂纹。裂纹分径裂、轮裂、干裂三种。径裂是在木材断面内部，沿半径方向开裂的裂纹；轮裂是在木材断面沿年轮方向开裂的裂纹，轮裂有成整圈的（环裂）和不成整圈的（弧裂）两种；干裂是出于树木干燥不均引起的裂纹，一般都分布在材身上，如断面上裂纹与材身上外露裂纹相连，一般统称为纵裂。

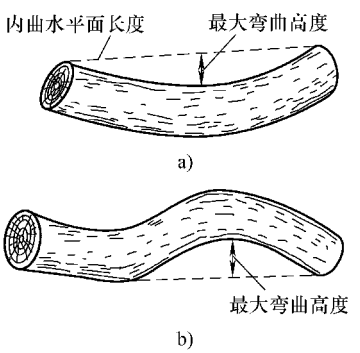


图4-16　弯曲

a）单面弯　b）多面弯

（5）树干形状缺陷　有弯曲、尖削、凹兜和大兜。弯曲——树干的纵向中心线向左右前后凸出的现象。弯曲（图4-16）有单面弯和多面弯两种，后一种比前一种的缺陷

更为严重。

弯曲见于所有树种，但阔叶材的比针叶材多。杉木树干笔直，松木较差；阔叶材中的赤杨、喜树较直，栎类最弯曲。树木在生长中受坡度和风向的影响，也常常使树干弯曲。

弯曲的原木不仅出材率降低，而且木材成斜纹理，减低木材强度。

尖削、大兜和凹兜也是树干形状的缺陷。尖削是树干上下部位直径相差悬殊的现象，如相差很小，叫圆满。大兜指树干靠根处特殊肥大的现象。凹兜（图 4-17）是指树干靠根部凹凸不圆滑而呈波浪状，又叫它板根。它们除使木材产生斜纹外，其他影响较小，用于胶合板材时，会降低出材率，一般用材不加限制。

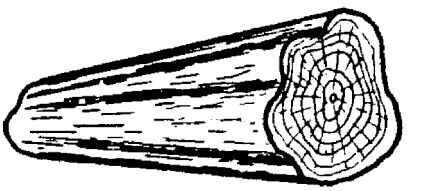
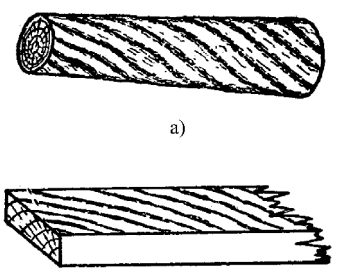


图 4-17　凹兜

（6）斜纹（扭转纹）　斜纹（图 4-18）是木材构造上的缺陷，即由于木材纤维排列不正常而出现的倾斜纹理。在原木中斜纹呈螺旋状的扭转，叫扭转纹，在成材的纵断面上，纹理呈倾斜方向。它的倾斜度，同一树株内外不一致。一般从外向内逐渐降低，扭转纹越大，从原木外表向内降低也越大；原木直径越大，其外部的扭转越是比细的大。但是在成材中，除由原木的天然斜纹所造成的以外，用带有弯曲、尖削、凹兜、大兜等缺陷的木材也能割出斜纹。此外由于下锯方法不正确，用通直的树干也会锯出斜纹来，这种斜纹是由于把原来为通直的纹理和年轮切断了，称为人为斜纹。人为斜纹与木材纵轴所构成的角度越大，则降低木材强度也越严重。如果用斜纹木材做榔头、斧头等的把柄或做椅子后腿，使用起来会很快折断。



a)

b)

图 4-18　斜纹

a）扭转纹　b）成材斜纹

乱纹是纹理不规则。乱纹的木材加工困难，刨切面也不光滑，抗弯强度和弹性都显著降低，但却能增加顺纹抗剪强度和抗劈裂。在使用上影响不大，一般不加限制。但有些木材乱纹，在制造特种细木工制品或胶合板时，可利用它的美丽花纹，所以这些木材是极有价值的材料。

涡纹（图 4-19）是在节子或夹皮附近，年轮局部弯曲呈旋涡状。涡纹会使木材强度降低。在一般用材中，因为对节子缺陷有规定，对涡纹没有限制。在有些场合，还可利用它来镶拼花纹。

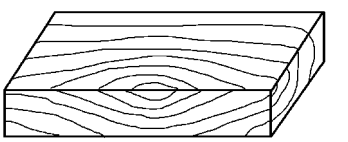


图 4-19　涡纹

（7）髓心和双心　髓心是树干断面中由第一

轮年轮组成的初生木质部分，在每一棵树中都有。带髓心的成材，干燥时会增加木材的开裂程度。双心是指树干同一断面同时存在两个髓心的现象，造材时在树丫部分截断后所形成。双心材因影响使用不大，所以在一般用圆材中不加限制。有些木材还可利用这部分花纹美观，刨切薄木用于贴面。

（8）其他缺陷 在树干内部，有由于水分或树脂过多而引起的缺陷，有水层、树脂囊、树脂漏等。水层是在木材局部有水的斑渍，经干燥后就消失了，但有水层的地方容易开裂。树脂囊（油眼）是在年轮中局部充塞树脂的沟槽，在横切面上呈月牙形裂隙，在径切面上呈长条状，突出的一面向树皮方向。树脂囊会使顺纹抗剪强度降低，当气温高时，常渗出树脂破坏油漆。常见于松、云杉、落叶松等木材。树脂漏（明子）是树木局部受伤后，大量树脂渗透于材质中，常使材色较深，木材薄片透明。由于树脂含量大，渗透性降低，容重增加，木材耐腐。有树脂漏的木材常用于提制松节油。

在树木生长时，受到机械损伤、火烧或病害后，常形成伤疤，其中有外伤、夹皮、偏枯和树瘤。常见的夹皮，它是树干部分受伤后，树干继续加粗，将受伤部分包入，于是形成夹皮（图4-20）。隐藏在内部的，叫内夹皮；暴露在外表的，叫外夹皮。圆材中的内夹皮一般对使用影响不大，故不予计算；外夹皮如未引起内部腐朽，按裂纹或死节计算，如已引起树干内部腐朽，按漏节计算。偏枯是树干外表局部枯死凹陷，它影响原木形状的改变，或带来木材内部杂斑和腐朽，降低出材率和使用价值。在木材缺陷标准中，一般是作外夹皮计算。但是，如不够一定深度的，在圆材中不予计算。树瘤又叫树包，它是树木因受生理或病害的影响，在树干上形成一个大瘤子。树瘤是制造家具和工艺品的珍贵材料。

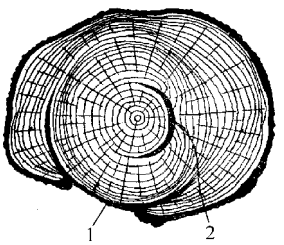


图4-20 夹皮

1—外夹皮 2—内夹皮

4.5.2 木材的加工缺陷

在制材加工中，还存在各种缺陷：

（1）缺棱和弯曲 按缺棱程度分钝棱和锐棱两种（图4-21），前者是板材在裁边时板边完全着锯，但锯口仅通过板材全长，而未通过全板厚度，边棱部分欠缺，叫钝棱；后者是在裁边时，锯口未能完全通过板边，有一部分板边没有着锯，叫锐棱。

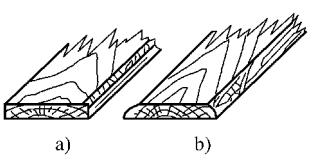


图4-21 缺棱

a）钝棱 b）锐棱

钝棱的允许范围在木材标准中有具体规定，锐棱没有规定。在加工中充分利用缺棱，合理允许使用钝棱板方材，对提高木材利用率起一定的作用。如果细木工方面充分利用钝棱，将会节约很多木材。

成材的弯曲是由于堆积不好和干燥不匀而引起。按弯曲方向不同，有弓形弯曲（弓形反翘）、边弯和翘曲（瓦形反翘）。

（2）锯割缺陷　严重影响产品质量和利用率。

制材锯割缺陷可按外形分为：鲶鱼头、偏沿子、水波纹、凸腹、洗涤板纹、局部弯曲、斜垄纹、毛刺等。

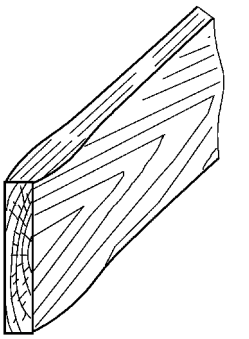


图 4-22　鲶鱼头

鲶鱼头（端部凸出）（图 4-22）是板材一端或两端材边产生凸起弯曲，形状像鱼头。产生原因主要是锯条邻近齿根处有肿瘤，在大带锯条上向里边凸起，而在小带锯条向外边凸起。克服办法是在肿瘤周围用碾锯机碾压，也可在平台上敲平，或更换压锯器上的磨损螺栓。

锯轮歪斜也可能引起这种缺陷。消除它的歪斜，必须经过严格的挂线校正。进料过猛也同样产生这种缺陷。一般在锯切开始时速度宜缓慢，等进到相当尺寸时，再提高速度。

锯卡子调整不好，如一面松一面紧，再加上螺钉没拧紧，锯料时锯条左右摆动，也会产生鲶鱼头。消除办法是将锯卡子拧紧，从而约束锯条不左右摆动。

偏沿子（图 4-23）是在板材两边或两端上，一边尺寸大，另一边尺寸小，材面形成偏斜状态。产生这种缺陷的原因是操作不慎引起的。在大带锯上翻楞与挂鹰嘴工作不协调，造成原木材面上部没有靠紧车桩就打上鹰嘴，而在摇尺以后上部仍不能靠紧车桩产生偏沿斜。在小带锯上是上手或下手操作精神不集中，技术不熟练所引起。如在进料时，上手进料不平衡，料子平面与锯比子没有全面接触而产生偏沿。有时跑车的车盘与车桩不垂直，或锯比子平面与台面不成直角所引起。解决办法是除了提高技术的熟练程度和认真操作外，应随时检查机床速度。

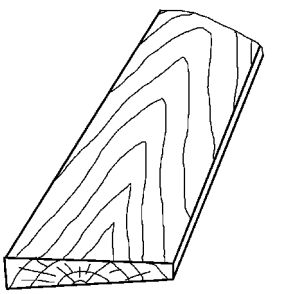


图 4-23　偏沿子

水波纹（波纹状）（图 4-24）是锯条修理不好所造成的，例如锯条压伸时，被压伸的地方距齿根过远。在锯割时，齿刃拉紧度不够造成松弛，发生摆动，或压伸的适张度不适当，在锯割时促使适张度消失，发生齿刃摆动，或锯料不均，或锯机上下轮缘不在同一直线上，使锯条在锯割时窜动和摆动等都能引起水波纹。消除办法是提高修锯质量，锯条压伸适当，或将锯口面拉紧些，或调整上下锯轮缘在一直线上，防止锯条的窜动。

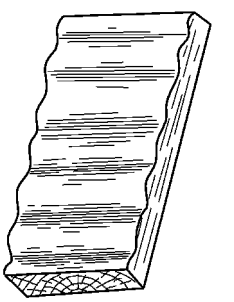


图 4-24　水波纹

材面凸肚（凸腹）（图 4-25）是板材一面凸出，使成材尺码超过公差范围。引起这种缺陷的原因是锉锯时锯料或

锯齿向一面偏倚，或锯身向一侧凸起；或可能在张紧时，锯卡子调整不当所引起。纠正的办法是将偏移的部分用砂轮磨去，再进行正常的压料或拨料。锯身向一侧凸起应敲平。将锯卡子、木块与锯条间隙调整一致。

洗涤板纹（间隔条纹）（图4-26）是材面像洗衣板一样凹凸不平。产生原因是锉锯质量低。如锯条上有个别的齿凸出或飞齿（个别齿偏斜）或有脱落齿，造成材面上有许多条痕。克服的办法是提高挫锯质量，用整料器使锯料均匀。如有锯齿脱落，立即补齿。

板面起毛（图4-27），是由于锯割时纤维受强烈的撕裂而起毛，好像在材面上铺一层毛巾。产生的原因是锯条切削不良或齿刃过钝，齿端角大或齿钩角小，机器震动，或锯轮回转速度低等都会引起这种缺陷。防止的办法是用锐利的锯齿，采用齿钩角大的锯齿，提高切削速度。

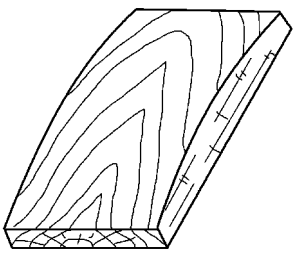


图4-25 材面凸腹

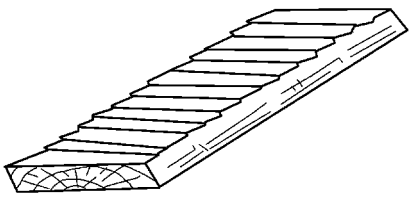


图4-26 洗涤板纹

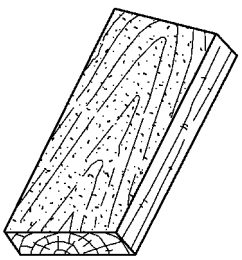


图4-27 板面起毛

板面反翘（图4-28），这种缺陷多发生在原木表里干燥不一致产生内应力，另一方面是弦切板，而锯齿又不锐利时，常引起木材顺纹理脱落而形成弧形弯曲。消除这种缺陷的办法，就是使原木保持干燥。

在锯割有大量树脂的树种时，树脂粘着锯齿的前刃，使锯齿变钝，形成斜垄纹（图4-29）。因此，在锯齿上多洒火油溶解树脂，并稍微降低进料速度，使锯齿不至于很快的磨钝。

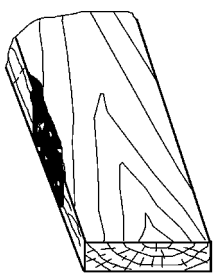


图4-28 板面反翘

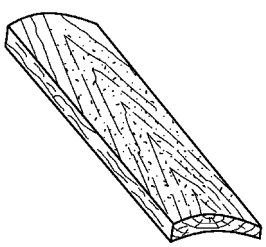


图4-29 斜垄纹

上述各种缺陷是带锯制材的锯割缺陷。在排锯、圆锯制材中，同样因机床误

差、使用和维修不善等原因产生一些缺陷。

4.5.3 有缺陷木材的合理利用

木材的上述缺陷，在不同程度上降低了木材的强度，影响了木材的使用。为此，在木材加工和使用中要特别注意。

对于不同的缺陷，应采取不同的解决办法。充分利用有缺陷的木材，是节约木材的重要环节。木材又是重要的森林资源，应该想方设法合理利用木材，充分发挥木材的最大经济效益。实践证明，有缺陷的木材不仅能够用，有时还能够创造更大的经济价值。

枝丫和节子是比较普遍的缺陷。如果遇到节子多的木材，可以用作承受压力的构件，因为节子对于这些用材没有什么影响。在制材中尽量把节子集中在少数板方材上，如果是活节，多锯为枕木。在使用横梁时，如节子在中间，应把有节子的一面，放在上面，避免留在受弯部位，因为上面受压缩应力，对强度影响不大。死节应予剔除，有些树种可以利用健全节、树丫刨切成薄木，用于制造家具或其他细木工制品。

腐朽是木材最严重的缺陷，腐朽的木材原则上不应使用，但是可根据腐朽程度和不同情况，把它加工利用，成为有用之材。例如在腐朽初期的色木，由于菌类引起变色的条纹或斑点，进行热压处理，成为压缩木，呈现出大理石一样的花纹，用于制造各种用品，花纹美观。还有利用白色腐朽菌侵蚀木素，只剩下纤维素的特点，把这些初期腐朽的木材，用于造纸或化学纤维。

裂纹严重的木材也应避免使用，表面虫沟、小虫眼，除影响美观外，在使用上一般影响不大。至于树干形状的缺陷，主要是影响木材的出材率。弯曲的原木，必须尽量裁成短料，以便合理利用。也有专用弯曲材的，如造船对弯曲材不加限制，反而利用它的弯曲，如护栏木。

大兜、根茎和斜纹木材，不易劈开，把它们刨切成薄木，却会有很美丽的花纹，可以镶饰各种木制品，是木材加工上极有价值的材料。

树瘤或叫树包，它是树木生长时，长在树干上的“瘤子”。木材纹理错综，形成美丽的花纹，并有特殊的强度和硬度、不开裂、不湿胀、不翘曲。常见于桦木、水青冈、核桃、榆木、槭树等树种。如核桃树瘤经切制成薄木，用于制造高级装饰用胶合板。近代在家具、乐器、胶合板和其他美术工艺用材上，虽有塑料贴面花纹的出现，但对树瘤薄木的要求还是不断增长，因为树瘤薄木花纹经久耐用，永不褪色，所以它一直被视为美术工艺的珍贵材料。这样的木材在自然界的数量有限，需要量又逐渐增加，于是就有人工培育树瘤的方法出现。

明子是大量松脂渗入木质而形成，常发生于树干的局部材质，或经采伐后的松树根株。松树年龄越老，直径越大，根株的树脂也越多。一般认为树脂漏（明子）影响材质，在家具生产中影响油漆，或渗出油脂染污。树脂漏是不正常沉积物，是

木材缺陷之一。但是，它不仅是制取松香、松节油的原料，也是烧制松烟的好材料。

此外，还有把带有缺陷的木材，完全打碎成木片，胶压成碎料板，或经打碎磨浆制成纤维板，或经水解制成酒精，或经干馏得到其他化学药品。总之，有些缺陷的木材，在某一条件下利用受到限制，而在另一条件下利用价值却很高，象树瘤、明子等就是这样。

4.6 我国主要木材的特点

我国的树木种类约有七千多种，适于制材的树木也在二千种以上，而常用的木材主要有下列几种：

（1）红松 又名海松或红果松，为我国东北长白山、小兴安岭地区的主要常绿树木，高达30～40m，胸径可达4m。红松树干纹理通直，年轮匀窄、明晰。组织结构较强，木质轻软，易干燥，干缩率小，即使在较高温度（110℃）干燥也不易开裂和变形，强度中等，握钉力适中且不易劈裂，耐腐朽，容易加工，切削面光滑，易于油饰、胶接，是用途很广的优良木材，一般用于制造建筑材料、家具等。

（2）马尾松 又名青松或枞杨，是盛产于长江流域、珠江流域以及台湾等地区的主要常绿乔木，通常高达30m，胸径可达1.5m。这种木材组织结构中粗，材质轻硬，纹理通直间或略斜而不均匀，木材具有针状大而多的脂道，有显著的松脂气味，抚摸时有油腻感。强度中等，握钉力强，干缩率中或小，干燥时易于粗裂。不耐腐蚀，易受白蚁侵蚀，对于胶接油饰和防腐处理略难于红松。这种木材用途有限，一般可用于包装箱上。

（3）白松 通常指冷松、鱼鳞松（云松），主要产于我国东北地区。这种木材纹理通直，木质较轻，易于加工，颜色呈淡黄色。边材与心材不明显，树脂含量少，易于开裂和腐朽。强度中等，易干燥，干缩率中小。在工业中多用于制作良好的造纸材料和包装用的板材。

（4）杉木 又名杉树，为常绿乔木。主要分布于长江流域以南及华南、西南等地区。这是一种速生树木，一般20～30年就可以成材，木质纹理匀直，结构较强，木质较轻软。易干燥，干缩率小，在干燥过程中不易发生缺陷，强度中等，加工容易，韧性很大，横断面很粗糙，纵剖面易起毛，握钉力弱并易沿木纹劈裂。油饰性差，漆后光泽不好，但胶接性良好，耐蚀性强，有香气不受白蚁侵蚀，且不易翘曲。一般多用来制作小型包装制品。

（5）桦木 为落叶乔木，产区遍于全国。在稍寒地区生长颇速，其中以东北的白桦柳和枫桦产量最大，材质最好，使用最广。材色黄褐至浅红褐，有光泽，无特殊气味。纵理通直，结构细致。材质较硬，强度中等，易干燥，不翘裂，干缩率大。耐蚀性差，内部常发生心材腐朽，因此影响其作用。油饰性能良好，胶接性能

中等，易于加工和防腐处理，握钉力强，但易劈裂。工业上多用作胶合板材料，也可用来制作包装箱。

（6）椴木　遍布全国，是东北地区重要阔叶树种之一，华北地区生长也很普遍。椴木纹理通直，结构颇细，年轮明晰、宽而匀。材质轻软，强度中至弱。易干燥且不易发生缺陷，干缩率中。不耐腐蚀，但防腐处理容易。油饰性中，胶粘性好，不易开裂，加工容易。多用作中低级胶合板的原料，供美术装饰板用。

（7）毛白杨　别名大叶杨、白杨、响杨等。主要分布于华北、西北和华东等地区。白杨纹理直，结构细，木质轻软，正常时易干燥，不翘曲变形。耐久性和强度均弱，油饰性、胶粘性均良好，握钉力弱，但不劈裂。在工业上用途很广，是造纸、纤维胶合板的优良原料，还可以制作包装箱、容器及其他细小的制品。

4.7　人造板材

为节约和综合利用木材，人造板材是一条重要途径。人造板材除胶合板外，所使用的原料均系木材采伐过程中的剩余物，使枝杈、截头、板皮、碎片、刨花、锯木等废料都得到利用。而且人造板材强度高、性能好。$1m^3$ 的人造板材可抵数立方米的木材使用。3mm 厚的纤维板、胶合板相当于 12mm 厚的板材。$2.2m^3$ 原木制成的 $1m^3$ 胶合板相当于 $5.7m^3$ 原木制成的木板。$3.3m^3$ 废木材可制成 1t 纤维板，相当于 $6m^3$ 原木所制的板材。$1.3m^3$ 废木材制成 $1m^3$ 刨花板，相当于 $2m^3$ 板材。此外，4～$5m^3$ 木材废料可制成 1t 厚纸板，用它作包装材料可抵 14～$16m^3$ 原木。因而世界各国为了充分利用木材，都竞相发展人造板材。人造板材的种类很多，主要包括胶合板、宝丽板、纤维板、细木工板、刨花板、木丝板和木屑板等。

4.7.1　胶合板

胶合板是将原木浸泡蒸煮后，沿年轮旋切成大张的薄木片，经过剪切、干燥，再用粘合剂按奇数层数，以各层纤维互相垂直的方向，粘合热压而成的人造板材。胶合板的最高层数为 15 层，木材的突出特点是顺纹强度高，横纹强度低，利用这个特点，可以把两块相邻的薄板按互相垂直的纹理方向胶合起来，这样就可发挥顺纹方向强度高的优点，使胶合板各方向强度相近，大大改进了木材的强度。

胶合板的结构——木片层数均采用奇数层一般为 3～11 层，即三层板、五层板、七层板等。建筑装饰工程常用的是三层板和五层板。相邻两木片的纤维应互相垂直。胶合板的表层板称为表板，或称面板和背板，中间各层称为心板或中板，表板长向是顺纹的称为顺纹胶合板，表板宽向是顺纹的称为横纹胶合板。一般用粗劣低廉软质的木材做心板，而表板则针对各种胶合板的用途选用美观贵重、优质的硬质木材制作，且两片表板的纹理总是平行，使制成的胶合板面积大、光洁美观、结构均匀、强度高而各向大致相同，不翘曲变形、不开裂、不易膨胀和收缩，而且一

致，其利用率约为普通板材的2~3倍。

胶合板一般采用椴木、桦木、樟木、色木、核桃楸、黄波罗、水曲柳、柞木、栎木等阔叶树种制作，针叶树如马尾松、云杉、云南松等也可制作胶合板，但针叶树制作的胶合板质量较阔叶树制作的要差。

胶合板品质的好坏与所采用的粘合剂品种有很大的关系，常用的粘合剂有干酪素胶、酚醛树脂胶、脲醛树脂胶等。它们的粘合力见表4-5。

表4-5 各种木材粘合剂粘合力比较

粘合剂	胶合板厚度/mm	粘合力/MPa		湿:干
		常态	浸水48h	
干酪素	16.0	3.42	1.65	0.48
酚醛树脂	15.8	4.93	3.87	0.80
脲醛树脂	15.3	4.82	3.06	0.64

胶合板材制胶合板时一般采用三种制造形式：热压固化胶合、冷压胶合和模压成型。

热压固化胶合是先把树脂溶液涂在木片上，放置至干燥，然后进行装配，再进行热压，使树脂固化将木片牢固地粘合在一起，热压温度140℃，压力为5~7MPa，时间为3~10min。

冷压胶合是将树脂溶液涂在木片上，尚未干透即进行压粘合，利用压力使树脂液渗入木材内，一般要加压力为0.5~1MPa，时间为4h以上。

胶合板还可以采用模压成型，制成各种形状的产品和容器，它是利用旋切的单板木片，经过干燥、涂胶，用成型模具在115℃温度下热压成型，再经过加工装配而成。模压胶合板制品表面平滑、质轻、坚固、不易变形和开裂，吸水率低，具有防潮防腐性能。

我国生产的阔叶树及针叶树材胶合板，按使用性能可分为四大类。

1）Ⅰ类（NQF)——耐气候、耐沸水胶合板：这类胶合板具有耐久、耐煮沸或蒸汽处理和抗菌等性能，能在室外长期使用。这类胶合板是以酚醛树脂胶或其他性能相当的粘合剂粘合制成。

2）Ⅱ类（NS)——耐冷胶合板：这类胶合板能在冷水中浸渍。能经受短时间热水浸渍，并具有抗菌性能，但不耐煮、不抗煮沸。可在潮湿条件下使用。

3）耐潮胶合板（NC)：能耐冷水短期浸泡，适于室内常态下使用。

4）不耐潮胶合板（BNC)。不耐水、湿，这类胶合板只能在室内干燥条件下使用。具有一定的粘合强度。

第一类胶合板按其材质和加工工艺质量分为一、二、三等级。一等质量最好，三等质量较低。

胶合板的厚度为2.5mm、2.7mm、3.4mm等。自4mm以上按每毫米递增

0.3mm 的为常用规格。

4.7.2 纤维板

纤维板是利用各种木材的纤维和棉秆、稻草、芦苇等植物纤维制成的人造板。不需用原木，也不受树种、规格的限制，凡木材的边角、碎料、截头、板皮、刨花、枝杈等都能利用。

纤维板制造过程，是先将原料经机械破碎后再放入蒸压釜中蒸压，变软后研磨成为分离的纤维，调成木浆，加入防水剂（石蜡）、粘合剂（松香），排去水分，加热、加压而成。也可将纤维干燥，然后加入胶料或树脂，压制成型。

纤维板的性能与胶合板类似，板面宽大，构造均匀，无木材的天然缺陷，耐磨、耐腐蚀、不易胀缩、翘裂，还具有绝缘性能等优点。经油浸或特殊加工后，还能耐水、耐火和耐酸，其利用率可达 90% 以上。

纤维板因成型时温度和压力的不同，分为硬质、半硬质和软质三种。硬质纤维板是在高温高压下成型而制得，软质纤维板不经过热处理而制成。纤维板可用于制作包装箱及其他包装材料使用。

硬质纤维板的物理、力学性能见表 4-6。

表 4-6 硬质纤维板的物理、力学性能

项　　目	特　　级	普通级		
		一等	二等	三等
容重（不小于）/（kg/m^2）	1000	900	800	800
静曲强度（不小于）/MPa	50	40	30	20
吸水率（不大于）（%）	15	20	20	—
含水率（%）	4 ~ 10	5 ~ 12	5 ~ 12	5 ~ 12

4.7.3 刨花板

刨花板又称碎木板或木屑板。原木加工成木制品，此时木材的利用率仅为 38% 左右，尚有 62% 不能充分使用，其中锯末占 15%，刨花占 17%，边角碎木占 28%。刨花板就是利用碎木、刨花经过切碎加工后与粘合剂（各种胶料、人造树脂等）拌和，再经加热压制而成。它的面宽、花纹美丽，没有木材的天然缺陷，但易吸潮，吸水后膨胀率较大，且强度不高。一般可以作为小型包装容器，也可以作大型包装容器的非受力壁板。刨花板一般分为两类。

（1）平压法刨花板　所受的压力与板面垂直，刨花排列的位置与板面平行。这类刨花板分为单层、三层及渐变三种。根据使用可进行覆面、涂饰等二次加工，也可直接使用。

（2）挤压法刨花板　所受压力与板面平行。这类刨花板分为实心和管状空心

两种，必须经覆面加工后，才能使用。

刨花板幅面尺寸基本上与胶合板相同，厚度尺寸为6mm、8mm、10mm、13mm、16mm、19mm、22mm、25mm、30mm等。

刨花板的检验应根据规定办理，主要是：尺寸准确、组织均匀、坚固、表面平整、洁净，无缺角、断裂、翘曲、开胶、脱落等现象。

刨花板的性能与所采用的粘合剂类型因制作工艺不同而异。刨花板物理、力学性能见表4-7。

表4-7 刨花板物理、力学性能

指标名称	挤压板	平压板	
		一级品	二级品
绝干容重/（kg/m³）	450～750	450～750	450～750
平面抗拉强度/MPa	—	>0.4	>0.3
静弯曲强度/MPa	>1	>18	>15
吸水厚度膨胀率（%）	—	<6	<10
绝对含水率（%）	9±4	9±4	9±4

4.7.4 覆面细木工板（大芯板）

覆面细木工板是用长短不一的小木条拼合成芯板，再在芯板两面胶贴覆面材料而制成的板。跟实木拼板相比较，它具有结构稳定，不易变形；节约优质木材；幅面大、表面美观；力学性能好等特点；和刨花板、纤维板相比较，具有实木的特性；跟胶合板相比，具有生产设备简单、耗胶量低、成本低等特点。

大芯板的最主要缺点是其横向抗弯性能较差，当作为书柜等项目的施工时，其大距离强度往往不能满足书的重量的要求，解决方法只能是书架的间隔缩小。

1. 细木工板的分类

1）按细木工板的芯板是否施胶可分为芯板不胶拼和芯板胶拼两种。

芯板胶拼，是将同等厚度的木条侧面涂胶拼成。然后，将芯板两面刨光，再胶贴单板而制成。不用胶拼的细木工板，在排好的芯板上、下表面各覆一层涂过胶的单板或薄胶合板，然后送入热压机或冷压机中胶压而制成细木工板。这种板加工简便，成本低，板面平整，形状稳定性好。强度也能符合一般家具生产的要求。

2）按表面加工状况，可分为一面砂光细木工板，两面砂光细木工板。

3）按所使用的胶合剂可分为Ⅰ类胶细木工板，Ⅱ类胶细木工板。

2. 覆面细木工板的尺寸规格

1）厚度：各类细木工板的厚度尺寸为16mm、19mm、22mm、25mm，常用板材厚度为16mm或19mm，特别需要的规格可按生产要求来确定。

2）幅面尺寸：各类细木工板常见的幅面尺寸：915mm×1830mm、1220mm×

1830mm、1220mm×2440mm。

3. 覆面细木工板的应用

覆面细木工板已被广泛应用于家具制作、建筑和室内装修等。由于覆面细木工板具有幅面大、耐久性好、易切削加工、表面美观、尺寸稳定等特点，是家具工业的理想原材料。

细木工板主要用于中、高级家具的制造，如大衣柜、五屉柜、书柜、酒柜等各种家具的板式部件。同时，也是室内装修的优良材料。

4.8 竹材

竹材种类很多，为亚洲特产。我国约有200种左右，产量极大，主要生长在我国南方各省区，年产量在20亿根以上。

能代替木材制作各种制品而使用的竹材主要有以下三种：

毛竹或称江南竹、孟宗竹，长10～25m，直径10～20cm。毛竹产量很大，约占竹材总产量的一半左右，其质坚韧，用途极广。

苦竹或称刚竹、台竹，长6～22m，直径10cm左右。产量比毛竹少，用途仅次于毛竹。

淡竹，长约10m，直径3～10cm，质坚韧致密，易于劈细，多作为上等工艺品的原料。

竹材具有生长快、质轻、强度高、弹性大、不易骤然折断、比木材价廉等优点。但竹材易于吸湿和失水，引起体积不稳定而开裂，且易被虫菌蛀蚀。因而竹材只能代替木材的部分用途。

4.8.1 竹材的构造

竹材，主要是竹的地上茎部（俗称竹竿），由竹青（表皮）、竹肉（纤维管束与基本组织）和髓部所组成。沿竹茎纵向每隔一定距离有一环状突起，称为竹节，竹枝即生于节上。竹节能增加竹茎的刚度。两竹节之间称为节间，靠近地面部分节间最短。

纤维管束是组成竹材的主要部分，为传递水分和养料的通道，在竹的横切面上呈现为许多斑点。纤维管束在纤维构造上又可分为导管、纤维、筛管和细胞腔等。

竹青部分的纤维管束含有较多的木质素，分布致密，强度比木材高数倍。靠近髓部的纤维管束分布较稀，强度不及木材。因此，竹材各部分的强度，是沿着横切面半径方向自内向外逐渐增大的。

竹材基本组织由薄壁细胞组成，分布在纤维管束的周围，用以储存养分，其强度不高。

节间细胞排列整齐与竹轴平行，并无斜纹或交错现象，竹材强度高，尤其是其

抗拉强度更高。

竹节部分的细胞呈扭结状，纤维数量减少，其强度仅为节间的50%左右。

4.8.2 竹材的物理、力学性质

竹材也是各向异性，其物理、力学性质较木材为稳定。

1. 竹材的物理性质

（1）含水率 竹材的纤维管束中含有能溶于热水、酒精的戊糖、果胶和淀粉等物质（占重量的6%～13%），故有强烈的吸湿性和还水性。其含水量随外界温度和湿度而改变，但无明显的纤维饱和点。当含水量在15%左右时，其强度随含水量的减少而增强，但含水量小于7%左右时，强度随水分减少而降低。当含水量介于15%～30%时，强度略减。含水量大于30%时则强度变化甚微。

（2）体积胀缩 竹材体积胀缩随含水量的多少而改变，各个方向不相一致，弦向最大（约0.274%），径向次之（约0.255%），纵向最小（约为0.222%）。

竹青的弦向收缩为髓部的三倍，纵向收缩小于髓部收缩。因此，竹材在干燥过程中极易翘曲和开裂。

（3）重量 竹材的重量随纤维管束分布情况、有无竹节，以及部位的不同而改变。通常竹节部分略重于节间，竹青较竹肉约重50%，基部重于梢部。竹材的容重更受含水量的影响，应以烘干后为准，一般介于0.6～1.2g/cm^{3}之间。

（4）耐久性 竹材在较高温度和湿度环境中容易发霉、变色和腐朽，而大大降低其强度，耐久性还不及木材。用于木材的防腐剂和处理方法也适用于竹材，以氯化锌或硫酸铜防腐剂效果最好。

竹材的开裂是影响其耐久性的另一重要原因，尤其是受压或受弯的竹材。为防止其开裂可采用刮去竹青的办法，并用铁丝或铁箍缠紧，或进行蒸压处理（蒸汽压力为0.2MPa，时间为2h），但效果还不能完全满意。

2. 竹材的力学性质

竹材的力学性质随竹材的种类、竹龄、部位和生长条件而有明显的不同，受含水量和竹纹方向的影响最大，其顺纹方向大于横纹方向。节间部分大于竹节部分，竹青部分大于竹内部分，基部大于梢部，一般来说，毛竹、台竹的力学性质以生长6年的竹材最大，超过或不及6年的都有所降低，其顺纹抗拉强度一般在90MPa以上，顺纹抗压强度在50MPa以上。

4.8.3 竹材质量检验和用途

（1）竹龄的鉴别 竹材年龄至今尚无鉴定方法，通常根据经验加以估计，一般生长不足三年的，竹皮青嫩，节间表面有灰色粉末，节下长有白粉，质地不密，竹茎细长。竹龄渐长后，竹皮逐渐转为白色或淡黄色、黄色至深黄色（受水浸蚀后则变白黄色，皮上常现云状斑痕）。竹龄超过3～4年时，竹质渐密，可以砍伐

使用；达到 6 ~7 年后，皮色已黄、节间生有白粉（白蜡质粉），竹肉增厚、坚硬、密实、质量最佳。山阳面生长的竹材，竹皮色淡黄而略带白色，质地较好；山阴面生长的竹材皮青色，质地一般较差，且易受虫蛀。

（2）竹材质量一般要求　好的竹材，竹茎应匀直，不尖削或弯曲，表皮青黄，所生白粉完整，竹肉厚实坚硬，薄而且长，不易折断，无斑疤、变色、干裂、损伤等缺陷。检验竹材时，应注意竹材样品的代表性，一切都应完全合乎规定。

（3）竹材的用途　根据目前我国工业的发展水平看，传统的木制品还在各相关行业中起举足轻重的作用。但我国是一个木材资源贫乏的国家，必须寻找别的材料或人造材料来代替宝贵的木材，而竹材就是很好的替代材料。其中竹编胶合板是近几年开发的一种比较好的以竹代木的（板）材料。

根据竹蔑片纤维条理结构，相互垂直，按经纬编织成席后经干燥、涂胶、组坯、热压合而成。制成的竹胶板具有良好的物理性能和化学性能，产品幅面大，纵横方向物理力学性能差异小、强度高、防湿性能好。此外，还有不脱落、不变形、抗虫蛀、耐磨、耐冲击、外观大方美观，易于加工，可锯、可刨、可钉钉子等优良性能。竹编胶合板与木材相同厚度比较，其静弯曲强度和抗拉强度与木材（云松）横纹方向基本相同，比木材的顺纹静弯曲强度大 20 多倍。竹编胶合板层厚可在2 ~ 20 层之间选择应用。它的幅面可达（2600×1400）mm^2。

竹编胶合板在我国很多地方已逐步采用，制成各类大、中、小型包装箱，用于机械设备包装、出口机电产品包装，代替大量木材，又节省资金，成本比木材包装降低一半左右。

竹材除了制成竹胶板代替木材制作包装箱外，还可编织成竹筐，包装蔬菜、水果以及一般的小型机电产品，也可以作为包装材料中的筋材，用于制作各种机电产品的包装箱等。

第5章　石　　材

石材分为天然石材和人造石材两种。天然石材是从天然岩石中开采而得的，经过加工形成工程需要的高级材料。其强度高、装饰性好、耐久、来源广泛，是广泛采用的建筑和装饰材料。而人造石材，无论装饰效果还是技术性能都显示了其优越性，成为一种新型材料。

石材按其使用部位分为三类：一为不承受任何载荷的内、外墙饰面材。二为承受一定载荷的地面、台阶、柱子的饰面材料（要求此类石材具有较高的物理力学性能和耐风雨性）。三为自身承重的大型纪念碑、塔、柱、雕塑等。

石材本身具有粗犷的质感及细致的气质，依使用场所不同，处理上也有所异。作为装修用饰面材料，其质量指标除抗压强度、耐久性，抗冻性、耐磨性、硬度等指标之外，常以其装饰性能（即色彩、花纹、光泽及质地纹理等）为主要评价指标，同时还要考虑其可加工性。

5.1　岩石与石材的基本知识

5.1.1　造岩矿物与岩石的构造和命名

1. 造岩矿物

地壳中的化学元素有许多种，矿物是地壳中的化学元素在一定的地质条件下形成的具有一定化学成分和一定结构特征的天然化合物和单质的总称。岩石是矿物的集合体，组成天然岩石的矿物称为造岩矿物。目前，已发现的矿物有3300多种，主要造岩矿物有30多种。由单一矿物组成的岩石叫单矿岩（如以方解石矿物为主的石灰岩），由两种或更多矿物组成的岩石叫多矿岩（如由长石、石英、云母等矿物组成的花岗岩）。由于岩石形成的地质条件很复杂，因此岩石没有确定的化学组成和物理力学性质。即使是同种岩石，但由于产地不同，其中各种矿物的含量、光泽、质感及强度、硬度和耐久性也呈现差异，这就形成了岩石组成的多变性，但造岩矿物的性质及含量仍对岩石的性质起决定性作用。

常用岩石的主要造岩矿物有以下几种：

（1）石英　是结晶的二氧化硅（SiO_2）。密度为2.65g/cm^3，莫氏硬度（刻划硬度）为7，无色透明至乳白色，强度高，材质坚硬，耐久，呈现玻璃光泽，具有良好的化学稳定性，但在受热至573℃以上时，因发生晶体转变，会产生开裂现象。

（2）长石　是钾、钠、钙等铝硅酸盐一类矿物的总称，包括正长石、斜长石等。密度为2.5～2.7g/cm^3，莫氏硬度为6，呈白、灰、红、青等不同颜色。坚硬，强度高，但耐久性不如石英，在大气中长期风化后成为高岭土。长石是火成岩中含量最多的造岩矿物，常含60%以上。

（3）角闪石、辉石、橄榄石　是铁、镁、钙等硅酸盐的晶体。密度为3～4g/cm^3，莫氏硬度5～7，呈深绿、棕或黑色，常称暗色矿物。坚硬，强度高，耐久性好，韧性大，具有良好的开光性。

（4）云母　是含水的钾、铁、镁的铝硅酸盐片状晶体。密度为2.7～3.1g/cm^3，莫氏硬度为2～3，具有无色透明、白、黄、黑各种颜色。解理极完全（指矿物在外力作用下，沿一定的结晶方向易裂解成薄片的性质），呈玻璃光泽，存在于岩石中影响耐久性和开光性，为岩石中的有害矿物。白云母较黑云母耐久，黑云母风化后形成桎石，为一种轻质保温材料。

（5）方解石　是结晶的碳酸钙（$CaCO_3$）。密度为2.7g/cm^3，莫氏硬度为3，通常呈白色。强度高，但硬度不大，开光性好，耐久性仅次于石英、长石。易被酸分解，易溶于含二氧化碳的水。

（6）白云石　是碳酸钙和碳酸镁的复盐晶体（$CaCO_3 \cdot MgCO_3$）。密度为2.9g/cm^3，莫氏硬度为4，呈白色或灰白色，性质与方解石相似，强度稍高，耐酸腐蚀性略高于方解石。

（7）黄铁矿　为二硫化铁（FeS_2）晶体。密度为5g/cm^3，莫氏硬度为6～7，呈黄色，但条痕呈黑色，无解理，耐久性差，在空气中易氧化成游离的硫酸及氧化铁，体积膨胀，产生锈迹，污染岩石，是岩石中常见的有害杂质。

岩石的性质与矿物组成有密切关系。由石英、长石组成的岩石，其硬度高、耐磨性好（如花岗岩、石英岩等）；由白云石、方解石组成的岩石，其硬度低、耐磨性较差（如石灰岩、白云岩等）。含有碳酸钙和碳酸镁的岩石，其耐火性较差，当温度达到700～900℃时开始分解，而石英含量较高的石材受热到573℃时，因体积膨胀会使石材开裂。由石英、长石、辉石组成的石材具有良好的耐酸性（如石英岩、花岗岩、玄武岩），而以碳酸盐为主要矿物的岩石则不耐酸，易受大气酸雨的侵蚀（如石灰岩、大理岩）。

2. 岩石的结构和构造

（1）岩石的结构　是指岩石的原子、分子、离子层次的微观构成形式。根据微观粒子在空间分布状态的不同，可分为结晶质结构和玻璃质结构，大多数岩石属于结晶质结构，少数岩石具有玻璃质结构。结晶质结构具有较高的强度、硬度、韧性、耐久性，化学性质较稳定，而玻璃质结构除有较高的强度、硬度外，相对来说，呈现较强的脆性，韧性较差，化学性质较活泼。结晶质结构按晶粒的大小和多少可分为全晶质结构（岩石全部由结晶的矿物颗粒构成，如花岗岩）、微晶质结构、隐晶质结构（矿物晶粒小，宏观不能识别，如玄武岩）。

（2）岩石的构造 是指宏观可分辨（用放大镜或肉眼）的岩石构成形式。通常根据岩石的孔隙特征和构成形态分为：致密状（花岗岩、大理岩）、多孔状（浮石、粘土质砂岩）、片状（板岩、片麻岩）、斑状、砾状（辉长岩、花岗岩）等。岩石的孔隙率大，并夹杂有粘土质矿物时，强度和耐水、耐冻性等耐久性指标都明显下降。具有斑状和砾状构造的岩石，在磨光后往往纹理绚丽、美观，具有优良的装饰性。具有片状构造的岩石，容易成层剥离，各向异性，沿层易于加工，具有特殊的装饰效果。

3. 岩石的命名

过去，石材界对岩石没有统一的命名规定，起名只是沿袭了古老约定俗成的方法。起的名称很不规范，现今仍有应用：

（1）地名加颜色 即石材产地加石材本身颜色：如丹东绿、莱阳绿、石棉红、天山蓝。

（2）形象命名 利用石材颜色、花纹特征比喻出自然界的实物：如残雪、碧波、螺丝转、虎皮、木纹、竹叶、浪花。

（3）形象加颜色命名 即以石材花纹颜色具有的实物形象加颜色命名：如艾叶青、琥珀红、玛瑙玉、黄金玉、松香红。

（4）人名（官职）加颜色命名 以著名人物或古代官职配上颜色组成：如关羽红、贵妃红、状元红、将军红、关帝白。

（5）动、植物加颜色 以动、植物名称配上该种动、植物本身的色彩命名：如孔雀绿、芝麻白、芝麻黑、菊花红、菊花白。

（6）纯颜色命名 像乳白、灰白、奶油白、银灰、橘黄等。

这样，迄今为止，我国上千个石材品种有了自己的名字。

随着石材工业的迅速发展，石材品种日益增多，由于没有规范，出现了一种石材几个名字，或几个编号，甚至几个省的几个品种同叫一个名字，例如：山东省有“中国兰”，四川省有“中国兰”，河北省有“中国兰”，使国内外市场变得混乱。为使我国石材品种统一命名与编号，进一步符合国家的法令法规，便于石材产品国内外商贸活动的开展，维护石材市场有序流通，有利于信息自动化管理和数据的共享，制订统一编号标准十分必要。

1970 年，国家曾经为普查资源和规划的需要。对全国石材品种按地区统一编为三个数字。以第一位数字代表地区或省，像北京地区打头为“1”，汉白玉叫“101”，东北地区以“2”打头，福建的以“6”打头，以此类推。然而，按地区编号，划分太粗。因此，数字编号没有推广起来。

纵观约定俗成的命名方法，以及数字编号的命名方法，它的弊端在于：用户从名字上分不清石材品种、产地、规格、质量等级、标准检验代号，进而无法确定该种石材的性能。随着石材装饰装修与建筑的迅速兴起，与国际交往也日趋频繁，原有的命名弊端更加突出。由中国石材工业协会等单位制定了天然石材统一编号的国

家标准 GB/T 17670—2008，规定了天然石材的分类与命名、编号原则、名称与编号，适用于花岗石、大理石、石灰石、板石、砂岩等商业用途的建筑装饰石材。

天然石材统一编号由一个英文字母、两位数字和两位数字或英文字母组成。

第一部分为石材种类代码，第二部分为石材产地代码，第三部分为产地石材顺序代码。

第一部分由一位英文字母组成，代表石材的种类。

①花岗石（Granite）——“G”；②大理石（Marble）——“M”；③石灰石（Limestone）——“L”；④砂岩（Sandstone）——“Q”；⑤板石（Slate）——“S”。

第二部分由两位数字组成，代表国产石材产地的省市名称，两位数字为 GB/T 2260—2002 规定的各省、自治区、直辖市行政区划代码。如北京市的代码为“11”，河北省的代码为“13”，山东省的代码为“37”。

第三部分由两位数字或英文字母组成，各省、自治区、直辖市产区所属的石材品种序号，由数字 0～9 和大写英文字母 A～F 组成。

像北京房山县产的汉白玉，过去就叫汉白玉。

新的命名为：房山汉白玉　统一编号 M1101。

又如，原山东荣成石岛红花岗石，原名叫石岛红。

新的命名为：石岛红　统一编号 G3786。

石材荒料则按照相应的行业标准命名。

如花岗石荒料　按 JC/T 204—2011《天然花岗石荒料》标准中“4.2.2”命名。产品按名称、编号、规格尺寸、大面标识（←→）、标准编号的顺序标记。

石岛红 G3786 规格尺寸为 250cm×75cm×130cm 的荒料标记如下：

名称：石岛红花岗石荒料

标记：G3786 250×75×130←→JC/T 204—2011

5.1.2　常用岩石的分类及性质

岩石按地质形成条件分为火成岩、沉积岩和变质岩三大类，它们具有显著不同的结构、构造和性质。

1. 火成岩

火成岩由地壳内部熔融岩浆上升冷却而成，又称岩浆岩，是地壳中主要的岩石，约占其总量的 89%。根据成岩深度的不同，火成岩又分为深成岩、浅成岩、喷出岩和火山岩。深成岩是岩浆在地表深处缓慢冷却结晶而成的岩石。其结构致密、晶粒粗大、密度大、抗压强度高、吸水性小、耐久性高，属于该类岩石的有花岗岩、辉长岩、闪长岩等。浅成岩为岩浆在地表浅处冷却结晶而成的岩石，其性质与深成岩相似，但由于冷却较快，故晶粒较小，如辉绿岩。喷出岩为岩浆流出地表急速冷却凝固而成的岩石。由于冷却迅速，大部分结晶不完全，形成隐晶质结构和

玻璃质结构，如玄武岩、安山岩。该种岩石若形成较厚的岩层，则多为致密构造。当形成的岩层较薄时，常呈多孔构造。喷出岩硬度大，抗压强度高，但韧性较差，性脆。火山岩是岩浆被喷到空中，急速冷却落下而形成的岩石。因喷到空气中急速冷却而成，故岩石内部含有较多的气孔，多数为玻璃质，化学活性较高。火山岩直接用于装饰工程的不多，主要用作轻骨料混凝土和砂浆的骨料，如浮石。

（1）花岗岩 属于酸性结晶深成岩，是火成岩中分布最广的岩石，其主要矿物组成为长石、石英和少量云母。主要化学成分为 SiO_2，含量在65%以上，为全晶质结构，有粗粒、中粒、细粒（分别称为伟晶、粗晶和细晶）、斑状等多种构造。一般以细粒构造性质为好，但粗、中粒构造具有良好的装饰色纹，有灰、白、黄、蔷薇色、红、黑多种颜色。

花岗岩体积密度为2600～2800kg/m^3，抗压强度为120～300MPa，莫氏硬度为6～7，耐磨性好，孔隙率低，吸水率小（0.1%～0.7%），抗风化性及耐久性好，使用年限为75～200年，高质量的可达千年以上，耐酸但不耐火，所含石英在高温下会发生晶变，体积膨胀而开裂。

花岗岩主要用于基础、踏步、室内外地面、外墙饰面、艺术雕塑等，属高档建筑装饰石材。

（2）玄武岩 为喷出火成岩。主要矿物为辉石和长石，常为隐晶结构。体积密度为2900～3300kg/m^3，抗压强度为100～500MPa，抗风化能力强，脆性及硬度均较大，加工较困难。主要用于基础、桥梁和路面铺砌及骨料等。

（3）辉长岩、闪长岩、辉绿岩 三种岩石均为岩浆岩。由长石、辉石、角闪石等构成。三者的体积密度均较大，为2800～3000kg/m^3，抗压强度100～280MPa，吸水率小（<1%），耐久性好，具有优良的开光性。常呈深灰、暗绿、黑灰、黑绿等暗色。除用于基础等砌体外，还可用作名贵的饰面材料。特别是辉绿岩，强度高但硬度低，锯成板材和异型材，经表面磨光，光泽明亮，常用于铺砌地面，镶砌柱面等。

2. 沉积岩

沉积岩是露出地表的各种岩石（火成岩、变质岩或早期形成的沉积岩），在外力地质作用下经风化、搬运、沉积，在地表或距地表不太深处经压固、胶结、重结晶等成岩作用而形成的岩石。沉积岩虽在地壳中只占总重量的3%，但分布却占岩石分布总面积的75%，是地表分布最广的一种岩石。按沉积物颗粒的大小，沉积岩可分为砾岩、砂岩和页岩。沉积岩的主要特征是呈层状构造，各层岩石的成分、构造、颜色均不同，且各向异性。与深成火成岩比较，沉积岩体积密度小，孔隙率和吸水率较大，强度和耐久性较差。

（1）石灰岩 为海水或淡水中的化学沉淀物和生物遗体沉积而成，主要成分为方解石，此外尚有石英、白云石、菱镁矿、粘土等矿物。石灰岩有密实、多孔和疏松等构造。密实构造的即为普通石灰岩，疏松的即为白垩（俗称粉刷大白）。颜色有灰白、灰、黄、浅红、浅黑等。

密实石灰岩体积密度为 2400 ~ 2600kg/m^3，抗压强度 20 ~ 120MPa，莫氏硬度为 3 ~ 4。当含有较多 SiO_2 时，强度、硬度和耐久性都高。石灰岩一般不耐酸，但硅质和镁质石灰岩有一定的耐酸性。

由于石灰岩呈层状解理，没有明显断面，难于开采为规格石材。主要用于基础、墙体等石砌体，也是生产石灰和水泥的原料，直接用于装饰工程的不多。但某些特殊的石灰岩品种也可作为高档装饰饰面，如上海大剧院室内大厅的墙面采用的即为产于美国明尼苏达州的著名石灰岩——黄砂石。

（2）砂岩　是由直径为 0.1 ~ 2mm 的石英等砂粒经沉积、胶结、硬化而成的岩石。根据胶结物的不同分为以下几种。

硅质砂岩：由 SiO_2 胶结而成。呈白、浅灰、浅黄，强度可达 300MPa，坚硬耐久，耐酸，性能类似于花岗岩。纯白色的砂岩又称白玉石，是优质的雕刻、装饰石材，人民英雄纪念碑周身的浮雕采用的即为白玉石。硅质砂岩可用于各种装饰、浮雕及地面工程。

钙质砂岩：由碳酸钙胶结而成。呈白、灰白色，是砂岩中最常用的品种。强度较大（60 ~ 80MPa），不耐酸，较易加工，应用较广。

铁质砂岩：胶结物为含水氧化铁。呈褐色，性能比钙质砂岩差。

粘土质砂岩：由粘土胶结而成。易风化，遇水易软化，应用较少。

由于砂岩性能相差较大，使用时需加以区别。

3. 变质岩

变质岩是地壳中的原有岩石（火成岩、沉积岩或早期生成的变质岩），由于岩浆的活动及地质构造运动的影响（高温、高压），在固体状态下发生再结晶作用而形成的岩石。在形成的过程中，岩石的矿物成分、结构、构造以至化学成分部分或全部发生了改变。常用的变质岩主要有以下几种。

（1）大理岩　是石灰岩或白云岩经高温、高压的地质作用重新结晶而成的变质岩，属于副变质岩（指结构、构造及性能优于变质前的变质岩）。主要组成矿物为方解石、白云石等。化学成分主要有 CaO、MgO 和少量的 SiO_2，一般 CaO 的含量大于 50%。体积密度 2600 ~ 2800kg/m^3，抗压强度为 60 ~ 110MPa，吸水率 < 1%（某些品种略大于 1%），莫氏硬度 3 ~ 4，耐用年限 150 年。纯大理岩构造致密，密度大但硬度不大，易于分割、雕琢和磨光。纯大理岩为雪白色，当含有氧化铁、石墨等矿物杂质时，可呈玫瑰红、浅绿、米黄、灰、黑等色调。磨光后，光泽柔润，绚丽多彩。大理岩的颜色、光泽与所含成分间的关系见表 5-1 和表 5-2。大理岩常用于高级建筑的装饰饰面工程。如栏杆、踏步、台面、墙柱面、装饰雕刻制品等。

表 5-1　大理岩的颜色与所含成分的关系

颜色	白色	紫色	黑色	绿色	黄色	红褐色、紫红色、棕黄色	无色透明
所含成分	碳酸钙、碳酸镁	锰	碳或沥青物	钴化物	铬化物	锰及氧化铁的水化物	石英

表 5-2 大理岩光泽与所含成分的关系

光泽	金黄色	暗红	蜡状	石棉	玻璃	丝绢	珍珠	脂肪
所含成分	黄铁矿	赤铁矿	蛇纹岩等混合物	石棉	石英、长石、白云石	纤维状矿物质、石膏	云母	滑石

（2）石英岩 是硅质砂岩受地质动力变化作用而生成的酸性变质岩，也是一种副变质岩。由于砂岩中的石英颗粒及天然胶结物在高压下重新结晶，因此结构致密、均匀，强度可达250～400MPa。硬度大，莫氏硬度为7。耐酸性能好，耐久性优良，使用年限可达千年以上。但由于坚硬，开采加工困难，主要用于纪念性建筑的饰面或以不规则形状应用于建筑物或装饰工程中。

（3）片麻岩 是花岗岩经高压地质作用重新结晶而成的变质岩，属于正变质岩（其构造、性能较变质前的原岩石差）。其矿物成分与花岗岩类似，呈片状构造，各向异性，沿解理方向易于开采和加工，垂直于解理方向抗压强度较高，可达120～250MPa。片麻岩的结晶颗粒为粒状或斑状，外观美丽，在工程中用途与花岗岩相似，但其抗冻性较差，经冻融循环，会层层剥落，在作为饰面石材时要考虑其使用的部位，以获得良好的应用效果。

5.1.3 石材的加工

从矿山开采出的石材荒料（指符合一定规格要求的正方或矩形六面体石料块材）运到石材加工厂后，经一系列加工过程才能得到各种石材制品。

1. 石材的加工方法

石材的加工根据加工工具的特性不同可分为两种基本方式：磨切加工和凿切加工。每种加工方式又可划分为两个阶段：锯割加工阶段——使石材具有初步的形状（厚度或幅面满足一定要求）；表面加工阶段——使石材充分显示出自身的装饰、观赏性（质感和色泽）。

磨切加工是最具现代化的石材加工方式，它是根据石材的硬度特点，采用不同的锯、磨、切割的刀具及机械完成石材的加工。这种加工方法自动化、机械化程度高，生产效率高，材料利用率高，是目前最常采用的一种加工方法。磨切加工顺序可先切后磨，也可先磨后切。先切后磨是把锯割所得的毛板割成预定规格后再进行表面加工；先磨后切是将锯割所得的毛板先进行表面加工，再切割成所要求的规格。这两种加工顺序可根据供货方式、产地远近、仓储条件、市场需求等条件综合考虑后给予选择。

凿切加工也是广泛采用的石材加工方法，它是采用人工或半人工的凿切工具，如凿子、剁斧、钢錾、气锤等。凿切工具加工石材的特点是可形成凹凸不平、明暗对比强烈的表面，充分突出石材的粗犷质感。但这种加工方法劳动强度较大，往往需工人较多的手工参与，虽然可采用气动或电动式机具，但很难实现完全的机械化

和自动化。

2. 石材加工的工艺流程

（1）锯割加工　锯割是石材加工的首道工序，该道工序是采用各种形式的锯机将石材荒料锯割成半成品板材，该工序不但耗费大（可占成品成本的 20% 以上），而且锯割工作完成的好坏直接影响以后的研磨工作。

石材荒料锯割出的毛板材数量的多少，直接影响石材加工的经济指标。这一指标可用石材的出材率表示，即 $1m^3$ 石材荒料可获板材的平方米数。如按 20mm 厚的板材计，一般石材的出材率为 12 ~ $21m^2/m^3$。可见受锯片厚度和荒料质量的影响，板材的出材率是较低的。

锯割加工的设备主要有框架锯（排锯）、盘式锯等，分别用于切割坚硬石材（花岗岩等）、较大规格荒料和中等硬度以下的小规格荒料。

（2）石材的表面加工　饰面石材是以石材特有的色泽、质感来美化建筑物的。但当石材还是荒料和毛板阶段，它们的颜色、花纹、光泽并未清楚的显示，特别是有些石材荒料的颜色、光泽与磨光后呈现出的色泽截然不同，因此可以说，石材只有通过其表面加工，才能具有观赏价值，从而满足建筑、装饰、艺术方面的要求。

石材的表面加工根据对表面的不同要求可分为研磨、刨切、烧毛、凿毛等。

1）研磨加工：研磨一般分为粗磨、细磨、半细磨、精磨、抛光五道工序。磨料多用碳化硅加结合剂（树脂和高铝水泥等），也可采用金刚砂，抛光时还需加各种不同的抛光剂。

抛光是石材研磨加工的最后一道工序，它可使石材表面具有最大反射光线的能力及良好的光滑度，同时使石材固有色泽花纹最大限度地显示出来。

抛光石材的方法大致可分为三类：第一类为毛毡草酸抛光法，适于抛光汉白玉、芝麻白、艾叶青等一类的以白云石和方解石为主要造岩矿物的变质岩。第二类为毛毡氧化铝抛光法，适用于抛光晚霞、墨玉、东北红等一类以方解石为主要造岩矿物的石灰岩质的沉积岩。第三类为白刚玉磨石抛光法，适于抛光上述两种方法不易抛光的，以长石、辉石、橄榄石、黑云母等多种不同矿物组成的岩石，如济南青等。

2）刨切加工：这种表面加工方法是使用刨床形式的刨石机对毛板表面进行往复式的刨切，使表面平整，同时形成有规律的平行沟槽或刨纹，这是一种粗面板材的加工方式。

3）烧毛加工：是将锯切后的花岗岩毛板，用火焰进行表面喷烧，利用某些矿物在高温下开裂的特性进行表面烧毛，使石材恢复天然粗糙表面，以达到特定的色彩和质感。

4）凿毛加工：这种表面加工方法是利用专门凿切手工工具，如剁斧、钢錾或鳞齿锤（一种带有 25 齿、36 齿或 64 齿的钢锤），在石材表面连续剁切，从而

形成凹凸深度不一的表面，主要适用于中等硬度以上各种火成岩和变质岩的表面加工。

经过表面加工的饰面石材可采用细粒金刚石小圆盘锯切割成一定规格的成品。

（3）检验与包装 加工好的产品应先检验尺寸、颜色、花纹及拼花效果等，然后方可包装。必要时要按实际使用状态（铺地或贴墙）检验其拼花效果。当地使用，可用缓冲衬垫和专用钢架包装出厂；运往外地，应用各种缓冲衬垫垫好，外包塑料薄膜，装入木框架箱出厂。

大理石包装时应避免用草绳、木丝、油纸作包装材料，以减少淋雨后对石材的污染，尤其是浅色大理石更要注意。

5.1.4 天然石材的选用

天然石材不同的品种，性能变化较大，而且由于其密度大、质量大、运输不方便，再加上材质坚硬，加工较困难，因此成本较高，尤其是一些珍贵品种。所以在建筑装饰工程中选用天然石材，必须要慎重。既要体现设计风格，又要经济合理。一般来说，天然石材的选用要考虑以下几个问题：

（1）材性的多变性 这里讲的材性，不但包括石材的物理力学性能（强度、耐水性、耐久性等），也包括石材的装饰性（色调、光泽、质感等）。同一类岩石，品种不同，产地不同，性能上也往往相差很大，故同一工程部位上应尽量选用同一矿山的同一种岩石。不能单凭几块样板，就武断决定。否则往往会出现批量产品才会显示出的色差、花纹变化等意想不到的情况，影响装饰效果，造成难以弥补的憾事。

（2）材料的适用性 不同的石材具有不同的特点，对不同的工程部位和装饰效果有不同的适用性：用于地面的石材，主要应考虑其耐磨性，同时还要照顾其防滑性；用于室外的饰面石材，主要应考虑其耐风化性和耐蚀性；用于室内的饰面石材，主要应考虑其光泽、花纹和色调等美观性。

（3）材料的工艺性能 是指石材便于开采、加工、施工安装的性质。包括加工性、开光性、可钻性。加工性指石材的割切、凿琢等加工工艺的难易程度。凡强度、硬度、韧性较高的石材都不易加工；质脆粗糙、有颗粒交错结构或含有层状、片状构造的石材，都难以满足加工要求。开光性是指岩石能磨成光滑表面的性质。致密、均匀、粒细的岩石一般都有良好的开光性；疏松多孔、有鳞状构造和含有较多云母的岩石，开光性均不好。可钻性是指石材钻孔的难易程度。板材安装时往往需钻安装孔，如可钻性不好，将会对钻孔造成困难，甚至会造成开裂。可钻性一般与强度、硬度、层理构造有关。

（4）材料的经济性 石材因密度大、质重，所以应尽量就地、就近取材，以减少运距，降低成本。不要一味追求高档次的石材，要选择既能体现装饰风格，又与工程投资相适宜的品种。

5.2 天然大理石

5.2.1 大理石的概念和特点

大理石是大理岩的俗称，是一种以碳酸钙为主，含微量氧化硅、镁、铁等金属、非金属杂质的石灰岩。世界所产大理石，以意大利为最多，以中国大理产的大理石为最美最奇，它的石质细腻，花纹美观，色彩绚丽，经过打磨，光滑如脂，还能显露出千姿百态的花纹，既是一种上等的建筑装饰材料，又可制作各种精美的工艺品。在工程上所指的大理石是广义的，除指大理岩外，还泛指具有装饰功能，可以磨平、抛光的各种碳酸盐类的沉积岩和与其有关的变质岩。如石灰岩、白云岩、砂岩、灰岩等。

大理石质地比较密实、抗压强度较高、吸水率低、表面硬度一般不大，属中硬石材。化学成分有 CaO、MgO、SiO_2 等，其中 CaO 和 MgO 的总量占 50% 以上。纯白色的大理石成分较为单一，但大多数大理石是两种或两种以上成分混杂在一起，因成分复杂，所以颜色变化较多，深浅不一，有多种光泽，形成大理石独特的天然美。国内部分大理石的物理力学性能、结构特征及化学成分见表 5-3。

表 5-3 国内部分大理石的物理力学性能、结构特征及化学成分

大理石品种	颜色	岩石名称	主要矿物成分	结构特征	体积密度/（g/cm^3）	抗压强度/MPa
雪浪	白色、灰白色	大理岩	方解石	颗粒变晶，镶嵌结构	2.72	92.8
秋景	灰色	大理岩	方解石 白水云母	微晶结构	2.71	94.8
晶白	雪白白色	大理岩	方解石	中、细颗粒结构	2.74	104.9
虎皮	灰黑色	大理岩	方解石	粒状变晶结构	2.69	76.7
杭灰	灰色白花纹	灰岩	方解石	隐品质结构	2.73	130.6
红奶油	浅粉红色	大理岩	方解石	微粒隐晶结构	2.63	67.0
汉白玉	乳白色	白云岩	方解石 白云岩	花岗结构	—	156.4
丹东绿	浅绿色	蛇纹石化硅卡岩	蛇纹石 方解石 橄榄岩	纤维状网格变晶结构	—	89.2
雪花白	乳白色	白云岩	方解石 白云石	中、细粒变晶结构	2.77	81.7
苍白玉	乳白色	白云岩	白云石	花岗结构	—	136.1

（续）

大理石品种	抗折强度/MPa	硬度 HBS	磨耗量/cm^3	吸水率（%）	产地
雪浪	19.7	38.5	17.5	1.07	湖北黄石
秋景	14.3	49.8	21.9	1.2	湖北黄石
晶白	19.8	—	—	1.31	湖北黄石
虎皮	16.6	55	16.3	1.11	湖北黄石
杭灰	12.3	63	14.9	0.16	浙江杭州
红奶油	16.0	59.6	—	0.15	江苏宜兴
汉白玉	19.1	42	22.5	—	北京房山
丹东绿	6.7	47.9	24.5	0.14	辽宁丹东东沟
雪花白	17.3	45	24.4	—	山东掖县
苍白玉	12.2	50.9	25.0	—	云南大理

大理石一般都含有杂质，尤其是含有较多的碳酸盐类矿物，在大气中受硫化物及水气的作用，容易发生腐蚀。腐蚀的主要原因是城市工业所产生的 SO_2 与空气中的水分接触生成亚硫酸、硫酸等所谓酸雨，与大理石中的方解石反应，生成二水硫酸钙（二水石膏），体积膨胀，从而造成大理石表面强度降低、变色掉粉，很快失去光泽，影响其装饰性能。

在各种颜色的大理石中，暗红色、红色的最不稳定，绿色次之，白色大理石成分简单，杂质少，性能较稳定，不易变色和风化。所以除少数大理石，如汉白玉、艾叶青等质纯、杂质少、比较稳定、耐久，可用于室外，绝大多数大理石品种只宜用于室内。

5.2.2 大理石的主要品种

我国大理石矿产资源极为丰富。储量大，品种也多，其中不乏优质品种。据有关资料统计，山东、安徽、江苏、江西、云南、内蒙古、吉林、黑龙江等 24 个省市中，天然大理石储藏量达 17 亿立方米，花色品种达到商业应用价值的有 390 多个，同时新的品种还在不断被开发。国产大理石主要品种见表 5-4。

我国云南省大理白族自治州的苍山十九峰，峰峰皆藏有大理石，而且品种多、花色美、质地佳，堪称石中精品。“大理石”就是以云南省大理县的大理城而得名，该地所产的大理石品种繁多、石质细腻、多彩绚丽、享誉中外。在远古时期，大理地区是一片汪洋大海，后由于地壳的运动、升迁，在五亿多年的地质变迁后，形成了山脉。原有的石灰岩、白云岩等岩石在区域动力作用下，变质而成大理岩。岩石中的各种花纹就是在变质过程中，一些矿物质的浸染而形成。

表 5-4 国产大理石主要品种

品 名	花 色 特 征	产 地
莱阳绿	深绿色，带有黑斑块，花纹斑点较大	山东莱阳
栖霞绿（1 号）	浅绿色，带有灰、白、黑斑块及白线	山东栖霞
条灰（1 号）	灰白色，黑白直线，线条清晰均匀	山东掖县
铁岭红	玫瑰红、肉红、深红、棕红并带有不同花纹	辽宁铁岭
纹脂奶	底色乳白、淡黄、带有红色条纹	贵州贵阳
晶墨玉	全黑、稍带白筋，以“黑桃皇后”著称	贵州贵阳
紫地满天星	咖啡色，带密集而均匀、白色淡黄色海生物化石星点	四川重庆市
汉白玉	玉白色，微有杂点和脉纹	北京房山、湖北黄石
晶白	白色晶体，细致而均匀	湖北
雪花	白间淡灰色，有均匀中晶，有较多黄翳杂点	山东掖县
雪云	白和灰白相间	广东云浮
墨晶白	玉白色、微晶、有黑色纹脉或斑点	河北曲阳
影晶白	乳白色，有微红至深赭的陷纹	江苏高资
风雪	灰白间有深灰色晕带	云南大理
冰浪	灰白色均匀粗晶	河北曲阳
黄花玉	淡黄色，有较多稻黄脉络	湖北黄石
凝脂	猪油色底，稍有深黄细脉，偶带透明杂晶	江苏宜兴
碧玉	嫩绿或深绿和白色絮状相渗	辽宁连山关
彩云	浅翠绿色底，深浅绿絮状相渗，有紫斑和脉纹	河北获鹿
斑绿	灰白色底，斑状堆状深草绿色点	山东莱阳
云灰	白或浅灰底，有烟状或云状黑灰色纹带	北京房山
晶灰	灰色微赭，均匀细晶，间有灰条纹或赭色斑	河北曲阳
驼灰	土灰色底，有深黄赭色，浅色疏脉	江苏苏州
裂玉	浅灰带微红底，有红色脉络和青灰色斑	湖北大冶
海涛	浅灰底，有深浅间隔的青灰色条状斑带	湖北
艾叶青	青底，深灰间白色叶状斑云，间有片状纹缕	北京房山
残雪	灰白色，有黑色斑带	河北铁山
螺青	深灰色底，满布青白相间螺纹状花纹	北京房山
晚霞	石黄间土黄斑底，有深黄叠脉，间有黑晕	北京顺义
蟹青	黄灰底，遍布深灰或黄色砾斑，间有白灰层	湖北
虎纹	红色底，有流纹状石黄色经络	江苏宜兴
灰黄玉	浅黑灰底，有红色、黄色和浅黄灰脉络	湖北大冶
锦灰	浅黑灰底，有红色和灰白色脉络	湖北大冶
电花	黑灰底，满布红色间有白色脉络	浙江杭州
桃红	桃红色，粗晶，有黑色缕纹或斑点	河北曲阳
银河	浅灰底，密布粉红和紫红叶脉	湖北下陆
秋枫	灰红底，有血红晕脉	江苏南京
砾红	浅红底，满布白色大小碎石块	广东云浮
桔络	浅灰底，密布粉红和紫红叶脉	浙江长兴
岭红	紫红碎螺脉，杂以白斑	辽宁铁岭
紫螺纹	灰红底，满布红灰相间的螺纹	安徽灵璧
螺红	绛红底，夹有红灰相间的螺纹	辽宁金县
红花玉	肝红底，夹有大小浅红石块	湖北大冶
五花	绛紫底，遍布绿灰色或紫色大小砾石	江苏、河北
墨壁	黑色，杂有少量浅黑色斑或少量土黄缕纹	河北获鹿
黑夜	黑色，间少量白络或白斑	江苏苏州

云南所产白色大理石又称苍山白玉或白玉，其晶莹纯净、洁白如玉，是大理石中的名贵品种，常用作高级的饰面石材。其余苍山大理石大体分为“彩花石”“云灰石”等类。

汉白玉是一种晶莹洁白的大理石，色白纯洁，内含闪光晶体，给人一尘不染和庄严肃穆的美感，是大理石中名贵品种，它是古老的碳酸盐类岩石（距今5.7亿年），与后期花岗岩侵入体接触，在高温条件下变质而成。汉白玉的矿物结晶颗粒很细，极为均匀，粒径0.1～0.25mm的居多数。色彩鲜艳洁白（乳白、玉白色），质细腻而坚硬、耐风化，是大理石中可用于室外的不多品种之一。汉白玉易加工成材，磨光后光泽绚丽，是工艺美术、雕塑等艺术造型的上乘材料。汉白玉的产量占整个大理石产量的30%左右，多作为雕塑等。从历史资料看，大理石的开采，起码可以追溯到唐代南诏以前，一千多年前唐代修建的大理崇圣寺三塔，建筑上就已采用精美的大理石雕刻制品，而且具有较高的工艺水平。历史上的皇宫陵墓如北京故宫和十三陵，均大量使用了大理石。同时大理石也是建筑装饰工程的高档饰面材料。

彩花大理石是大理所产大理石中的精品。该种岩石呈薄层状，经研磨、抛光后，以白色底板上展现多姿多彩的花纹为特点。可呈现出色彩斑斓、千姿百态的自然图案，有黄、红、绿等色彩，这些色彩由石中原始藻类变化而来，致使石纹奇幻，呈现天然画图，像山水林木、花草虫鱼、云雾雨雪、漫天云霞、奇岩怪石、山水人物等瑰丽、逼真的画面，为世界之罕见。按其花纹、色泽的不同，又分为“绿花”“秋花”和“水墨花”三个品种，其中“水墨花”因其图案起黑色、淡黑色的花纹，酷似优美的水墨画，是大理石中最美的一种，天然石纹宛如出自丹青妙笔。因为彩花石开采不易，这种矿石夹在云灰石的矿床之中，占整个大理石产量的10%左右。

云灰石是灰白色底板上呈现灰蓝色的云水状花纹的大理石。云灰大理石的特点是其花色多呈云灰色，或云灰色底面上泛起一些类似自然云朵状的花纹。看起来有的像青云直上，有的像乱云飞渡，有的如乌云滚滚，有的若浮云漫天。其中花纹状如波纹的一类，因云灰石摸之若湿，图似水波荡漾，称为水花石。云灰石产量最高，约占整个大理石产量的60%左右。它石质细腻，色泽美观，加工性能优良，易于锯切、抛光，是优良的建筑用石材，被广泛用于制作工艺品。不论是宏伟壮观的殿堂楼阁，还是轻巧的园林亭台，到处都有大理石立雕动物，浮雕栏杆，陈设的屏风、桌面、茶几、桌面、花盆、花瓶、笔筒、砚台、压条以及础石、地砖与整个建筑物融为一体，交相辉映，具有浓郁的东方格调。还有生活用品如台灯、餐具、酒具、茶具、石臼、烟灰缸、面板等。

除以上所介绍的几种大理石，广西的桂林黑、辽宁铁岭的东北红、山东莱阳的莱阳绿、河南淅川的松香黄和米黄等都是闻名的大理石品种。

5.2.3 天然大理石板材的贮存和选用

天然大理石板材，表面光亮、细腻，易受污染和划伤，所以应注意在室内贮存，室外贮存时应加遮盖。存放时应按品种、规格、等级或工程部位分别码放。直立码放时，应光面相对，倾斜度不大于15°，层间加垫隔离，垛高不得超过1.5m；平放时，也应光面相对，地面须平整，垛高不得超过1.2m。若为包装箱，码放高度不得超过2m。

天然大理石板材是高级装饰工程的饰面材料。一般用于宾馆、展览馆、影剧院、商场、图书馆、机场、车站等建筑的室内墙面、柱面、服务台、栏板、电梯间门口等部位。由于其耐磨性相对较差，虽也可用于室内地面，但不宜用于人流较多场所的地面。大理石由于耐酸腐蚀能力较差，除个别品种外，一般只适用于室内。

除整板铺贴外，大理石厂生产光面和镜面大理石时裁割下的大量边角余料，经过适当的分类加工，也可制成碎拼大理石墙面或地面，是一种别具风格、造价较低的高级饰面，可用以点缀高级建筑的庭园、走廊等部位，使建筑物丰富多彩。

5.3 天然花岗石

5.3.1 花岗石的概念和特点

花岗石是花岗岩的俗称。建筑装饰工程上所指的花岗石泛指各种以石英、长石为主要组成矿物，并含有少量云母和暗色矿物的火成岩和与其有关的变质岩，如花岗岩、辉绿岩、辉长岩、玄武岩、橄榄岩、片麻岩等。

花岗石构造致密、强度高、密度大、吸水率极低、材质坚硬、耐磨，属硬石材。花岗石的化学成分有 SiO_2、Al_2O_3、CaO、MgO、Fe_2O_3 等，其中 SiO_2 的含量常为60%以上。因此其耐酸、抗风化、耐久性好，使用年限长。从外观特征看，花岗石常呈整体均粒状结构，称为花岗结构。品质优良的花岗石，石英含量高、云母含量少、结晶颗粒分布均匀、纹理呈斑点状、有深浅层次，构成该类石材的独特效果，这也是从外观上区别花岗石和大理石的主要特征。花岗石的颜色主要由正长石的颜色和云母、暗色矿物的分布情况而定。其颜色有黑白、黄麻、灰色、红黑、红色等。部分花岗石结构特征物理力学性能见表5-5。

5.3.2 花岗石的品种

我国花岗石的资源极为丰富，储量大、品种多。山东、江苏、浙江、福建、北京、山西、湖南、黑龙江、河南、广东等十省市都有出产，花色品种有90多个。北京的白虎涧（花岗岩）、济南的济南青（辉长岩）、青岛的黑色花岗石（辉绿岩）、四川石棉的石棉红、湖北的将军红、山西灵邱的贵妃红都是花岗石的主要品种。国产花岗石的主要品种见表5-6。

表 5-5 部分花岗石结构特征、物理力学性能

花岗石品种	岩石名称	颜色	结构特征	物理力学性能				
				体积密度/(g/cm^3)	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	肖氏硬度HS	磨耗量
白虎涧	黑云母花岗岩	粉红色	花岗结构	2.58	137.3	9.2	86.5	2.62
花岗石	花岗岩	浅灰、条纹状	花岗结构	2.67	202.1	15.7	90.0	8.02
花岗石	花岗岩	红灰色	花岗结构	2.61	212.4	18.4	99.7	2.36
花岗石	花岗岩	灰白色	花岗结构	2.67	140.2	14.4	94.6	7.41
花岗石	花岗岩	粉红色	花岗结构	2.58	119.2	8.9	89.5	6.38
笔山石	花岗岩	浅灰色	花岗结构	2.73	180.4	21.6	97.3	12.18
日中石	花岗岩	灰白色	花岗结构	2.62	171.3	17.1	97.8	4.80
峰白石	黑云母花岗岩	灰色	花岗结构	2.62	195.6	23.3	103.0	7.83
厦门白石	花岗岩	灰白色	花岗结构	2.61	169.8	17.1	91.2	0.31
砻石	黑云母花岗岩	浅红色	花岗结构	2.62	214.2	21.5	94.1	2.93
石山红	黑云母花岗岩	暗红色	花岗结构	2.68	167.0	19.2	101.5	6.57
大黑白点	闪长花岗岩	灰白色	花岗结构	2.62	103.6	16.2	87.4	7.53

表 5-6 国产花岗石的主要品种

品 名	花色特征	产 地
白虎涧	肉粉色带黑斑	北京市昌平县
将军红	黑色棕红浅灰间小斑块	湖北省
芝麻青	白底、黑点	湖北省黄石市
济南青	纯黑色（辉长岩）	山东省济南市
莱州棕黑	黑底棕点	山东省掖县
莱州红	粉红底深灰点	山东省掖县
黑花岗石	黑色，分大、中、小花	山东省临沂县
泰安绿	暗绿色（花岗闪长岩）	山东省泰安市
莱州白	白色黑点	山东省掖县
莱州青	黑底青白点	山东省掖县
红花岗石	紫红色或红底起白花点	山东省、湖北省

在世界石材贸易市场，花岗石产品所占的比例不断增长，约占世界石材总产量的36%。在国际上，花岗石板材可分为三个档次：高档花岗石抛光板主要品种有巴西黑、非洲黑、印度红等，这一类产品主要特点是色调纯正、颗粒均匀，具有高雅、端庄的深色调；中档花岗石板材主要有粉红色、浅紫罗兰色、淡绿色等，这一类产品多为粗中粒结构，色彩均匀变化少；低档花岗石板材主要为灰色、粉红色等色泽一般的花岗石及灰色片麻岩等，这一类的特点是色调较暗淡、结晶粒欠均匀。

5.3.3 天然花岗石板材的贮存和应用

天然花岗石板材材质坚硬、耐腐蚀、抗污染，但贮存时仍应注意保护板面，严禁搬运时滚碾、碰撞，并尽可能在室内贮存。堆码要求与天然大理石板材相同。

花岗石属酸性岩石，极耐酸性腐蚀，多用于内外墙、地面。大理石由于不耐风化，故较少用于室外。花岗石的化学成分随产地不同有所区别，某些花岗石含有微量放射性元素，对这类花岗石应避免用于室内。

花岗石荒料经锯切加工制成花岗石板材后，可根据不同的用途，用不同的工序将花岗石板材加工成以下品种。

（1）剁斧板材　经剁斧加工、表面粗糙、具有规则的条纹状斧纹。一般用于室外地面、台阶、基座等处。

（2）机刨板材　经机械加工、表面平整、有相互平行的机械刨纹。一般用于地面、台阶、基座、踏步等处。

（3）粗磨板材　经过粗磨，表面光滑、无光泽，常用于墙面、柱面、台阶、基座、纪念碑、基碑、铭牌等处。

（4）磨光板材　经过磨细加工和抛光，表面光亮、晶体裸露，有的品种同大理石一样具有鲜明的色彩和绚丽的花纹。多用于室内外地面、墙面、立柱等装饰及旱冰场地面、纪念碑、墓碑、铭牌等。

花岗石自古就是优良的建筑石材，有“千年石烂”之美称，但因其坚硬，开采加工较困难，故造价较高，属于高级装饰材料，主要应用于大型公共建筑或装饰等级要求较高的室内外装饰工程。花岗石因不易风化，外观色泽可保持百年以上，所以粗面和细面板材常用于室外地面、墙面、柱面、勒脚、基座、台阶；镜面板材主要用于室内外地面、墙面、柱面、台面、台阶等，特别适宜做大型公共建筑大厅的地面。

室内地面铺石多为磨光面，也有用光面板。但要注意以免滑倒，凹凸面多用在庭园、室外踏步或楼梯阳台、屋顶平台。但凹凸不可起伏太大，而铺的形状有规则形、不规则形、圆形、弧形、后形等，铺设时一定要牢实，否则十分危险。

石材在设计上可分为两类：

1）自然原色：可与木材、砖等配合设计，多采用粗犷的石材，色彩也较深。

2）配合现代感：多用现代感石片，如人造石片、光面大理石板、花岗石板。设计上可利用壁布、暖色壁纸及现代感的家具、大玻璃窗。

选用石材应注意的事项：

① 是否符合机能需要，又不妨碍实用性。

② 选用的石材是否与室内色彩及材质协调配合？

③ 施工及保养是否容易？

④ 石材的取得及搬运问题。

⑤ 选用的石材是否太贵？是否须用别的代替？

⑥ 考虑装潢程序。是否会污染房子原有装潢及家具？

5.3.4 天然石材的保养

因石材有毛细孔，故磨光后两个月内 5～10 天打蜡一次，使蜡进入毛细孔内，这样可使石材不会变色，尤其是色淡的石材，以后照一般保养法 1～3 个月打蜡一次即可。

5.4 其他石材

工程用天然石材除最常用的大理石、花岗石系列外。还有其他天然石材系列。

5.4.1 石英石系列

变色石英石：受不同的光度与角度折反射时，会变色。

云黑石英石：较深色，有光泽。

黑岩石英石：呈暗黑色，日本进口，质硬，有天然麻面，切片时要横纹切制，不可磨光，否则失去价值。

5.4.2 云母石系列

云母石，也称梦幻石，有带金色、银色两种，表面呈凹凸感。

5.4.3 筋石系列

筋石，即米白色石材内含有色之筋纹，目前进口的有红筋石（内含红色丝线）、绿筋石（内有绿线者）。

5.4.4 化石系列

象牙石：细白螺结晶化石，白色，莫氏硬度为4，品质稳定，不易变色。

米黄石：贝壳结晶为主体的化石，共有 6 种颜色，珍珠米黄、浅米黄、深米黄、芝麻米黄等。

缺点：天然纹路较多，较脆，硬度不高。

5.4.5 玉石系列

玉石质较脆，玻璃质较多，故只能用作浴室台面或柜台，硬度不高，但表面色泽半透明，十分美观。目前进口的有黄玉石（米色中带黄色）、青玉石（米色中带青绿色）。

5.4.6 卵石

表面圆滑，可堆砌施工。一般的尺寸：小卵石为 0.9 ~ 3cm，中卵石为 3 ~ 9cm，大卵石为 9cm 以上，设计应与灯光配合。

5.4.7 木纹石、洞石、黑珍珠和南非金沙石

木纹石：表面为浅灰咖啡色，中有木纹状。

洞石：面有蜂巢般小洞，故使用上要用水泥及色粉补洞。硬度不足，易磨损，不易清洁保养，不可用于外墙及地面。

黑珍珠：呈黑色，结晶较大。

南非金沙石：石材带金沙色泽，十分艳丽。

5.5 青石板与板岩饰面板

5.5.1 青石板

青石板系水成沉积岩，主要矿物成分为 $CaCO_3$，材质软，易风化，其风化程度及耐久性随岩体埋深情况差异很大。如青石板处于地壳表层，埋深较浅，风化较严重，则岩石呈片状，易撬裂成片状青石板，可直接应用于建筑，这样的青石板在我国东北及西南地区较多，如岩石埋藏较深，则板块厚，抗压强度（可达 210MPa）及耐久性均较理想。可加工成所需的板材，这样的板材按表面处理形式可分为毛面（自然劈裂面）青石板和光面（磨光面）青石板两类。

毛面青石板由人工用錾子按自然纹理劈开，表面不经修磨，纹理清晰，再加上本身固有的暗红、灰绿、蓝、紫、黄等不同颜色，搭配混合使用时，可形成色彩丰富，有变化又有一定自然风格的青石板贴面。用于室内墙面可获得天然材料粗犷的质感。如用于地面，不但起到防滑的作用，同时有一种硬中带“软”的效果，效果甚佳。

光面青石板是一种较为珍贵的石材，可用于柱面、墙面，也可采用不规则的板块，组成有一定构成规律的自然图案，有很独特的装饰风格。

在我国许多公共建筑中都采用了青石板。如北京动物园爬行动物馆、深圳博物馆展楼都采用青石板贴面，获得了理想的建筑装饰效果。

5.5.2 板岩板

板岩系由粘土页岩（一种沉积岩）变质而成的变质岩，其矿物成分为颗粒很细的长石、石英、云母和粘土。板岩具有片状结构，易于分解成薄片，获得板材。它的解理面与所受的压力方向垂直而与原沉积层无关。板岩质地坚密，硬度较大；

耐水性良好，在水中不易软化；耐久，寿命可达数十年至上百年。板岩有黑、蓝黑、灰、蓝灰、紫、红及杂色斑点等不同色调，是一种优良的极富装饰性的饰面石材。其缺点是自重较大，韧性差，受震时易碎裂，且不易磨光。

板岩饰面板大多用于覆盖斜屋面以代替其他屋面材料。也常用作非磨光的外墙饰面，常做成面砖形式，厚度为5.8mm，长度为300～600mm，宽度为150～250mm。以水泥砂浆或专用胶粘剂直接粘贴于墙面，是很流行的一种饰面材料，常被用作外墙饰面，也常用于室内局部墙面装饰，通过其特有的色调和质感，营造一种欧美的乡村情调。

5.6 人造饰面石材

天然石材虽有许多优良的性能，但由于其资源分布不均，加工后成品率低，因此成本较高，尤其一些名贵品种更显价格昂贵。在大型装饰工程中，石材的成本常常对总工程造价起决定作用。为适应现代装饰业的需要，人造饰面石材应运而生。

人造石材发展至今已有60多年的历史。1948年意大利就已成功试制水泥型人造大理石。1958年美国开始人造大理石平板的生产，到1970年，半数以上的住宅都不同程度采用了人造大理石。1970年至1980年的10年间，日本对人造石材进行了较深入的研究，发表了许多专利。我国从1970年开始引进人造石材的生产技术，许多装饰工程都采用了人造石材，积累了人造石材生产和使用的经验。除上述天然石材外，人造石材的应用十分广泛，目前人造石材主要分人造花岗石、大理石系列和人造艺术石两大系列，前者分地面用材和墙面用材，人造艺术石系列目前主要用在墙面。其外观与天然石相似，是采用无机颜料以手工作业着色，色彩丰富，能有千种以上不同变化，且特性与天然石一样为不可燃性，不需保养，施工方式与贴瓷砖相同。

人造饰面石材是采用无机或有机胶凝材料作为粘合剂，以天然砂、碎石、石粉或工业渣等为粗、细填充料，经成型、固化、表面处理而成的一种人造材料。它具有以下特点：

1）质量轻、强度大、厚度薄。某些种类的人造石材体积密度只有天然石材的一半，强度却较高，抗折强度可达30MPa，抗压强度可达110MPa。人造饰面石材厚度一般小于10mm，最薄的可达8mm。通常不需专用锯切设备锯割，可一次成型为板材。

2）色泽鲜艳、花色繁多、装饰性好。人造石材的色泽可根据设计意图制作，可仿天然花岗石、大理石或玉石，色泽花纹可达到以假乱真的程度。人造石材的表面光泽度高，某些产品的光泽度甚至超过天然石材。

3）耐腐蚀、耐污染。天然石材或耐酸或耐碱，而聚酯型人造石材，既耐酸也耐碱，同时对各种污染具有较强的耐污力。

4）便于施工、价格便宜。人造饰面石材可钻、可锯、可粘结，加工性能良好。还可制成弧形、曲面等天然石材难以加工的几何形状。一些仿珍贵天然石材品种的人造石材价格只及天然石材的几分之一。

除以上优点外，人造石材还存在一些缺点，如有的品种表面耐刻划能力较差，某些板材使用中发生翘曲变形等，随着对人造饰面石材制作工艺、原料配比的不断改进、完善，这些缺点和问题是可以逐步克服的。

按照生产材料和制造工艺的不同，可把人造饰面石材分为以下几类：

5.6.1 水泥型人造饰面石材

这种人造石材是以各种水泥（硅酸盐水泥、白色或彩色硅酸盐水泥、铝酸盐水泥等）为胶凝材料，天然砂为细骨料，碎大理石、碎花岗岩、工业废渣等为粗骨料，经配料、搅拌、成型、加压蒸养、磨光、抛光而制成。这种人造石材成本低，但耐酸腐蚀能力较差，若养护不好，易产生龟裂。

该类人造石材中，以铝酸盐水泥作为胶凝材料的性能最为优良。因为铝酸盐水泥（也称矾土水泥）的主要矿物组成为 $CaO \cdot Al_2O_3$（简写为 CA），水化后生成的产物中含有氢氧化铝胶体，它与光滑的模板表面相接触，形成氢氧化铝凝胶层。同时氢氧化铝凝胶体在凝结硬化过程中，不断填充粗、细骨料间的空隙，形成致密结构，因而表面光亮，呈半透明状，同时花纹耐久、抗风化，耐火性、耐冻性、防火性等性能优良。缺点是为克服表面返碱，需加入价格较高的辅助材料；底色较深，颜料需要量加大，使成本增加。

5.6.2 聚酯型人造饰面石材

这种人造石材多是以不饱和聚酯为胶凝材料，配以天然大理石、花岗石、石英砂或氢氧化铝等无机粉状、粒状填料，经配料、搅拌、浇注成型。在固化剂、催化剂作用下发生固化，再经脱模、抛光等工序制成。目前，我国多用此法生产人造石材。使用不饱和聚酯，产品光泽好、色浅、颜料省、易于调色。同时这种树脂粘度低、易于成型、固化快。成型方法有浇注成型法、压缩成型法和大块荒料成型法。

聚酯型人造石材的主要特点是光泽度高、质地高雅、强度硬度较高、耐水、耐污染、花色可设计性强。缺点是填料级配合不合理，产品易出现翘曲变形。

按表面图案的不同，可分为人造大理石、人造花岗石、人造玛瑙石和人造玉石等几种。

1. 人造大理石

人造大理石有类似大理石的花纹和质感。填料最大粒度可在 0.5 ~ 1mm 之间，可用石英砂、硅石粉和碳酸钙。

2. 人造花岗石

人造花岗石有类似花岗石的花色质感。如粉红底黑点、白底黑点等品种。填充

料配比是按其花色而特定的。

3. 人造玛瑙石

人造玛瑙石有类似玛瑙的花纹和质感。所使用的填料有很高的细度和纯度，制品具有半透明性，填充料可使用氢氧化铝（三分子结晶水）和合适的大理石粉料。

4. 人造玉石

人造玉石有类似玉石的色泽，半透明状。所使用的填料有很高的细度和纯度，有仿山田玉、仿芙蓉石、仿紫晶、仿彩翠等品种。

人造石材常用于室外立面、柱面装饰；室内铺地和墙面装饰；卫生洁具，如洗面盆、浴缸、便器等产品。此外，还可作楼梯面板、窗台板、服务台面、茶几面等。

5.6.3 树脂型人造石材

1）色彩花纹仿真性强，其质感和装饰效果完全可与天然大理石和天然花岗石媲美。

2）强度高，不易碎，其板材厚度薄，重量轻，可直接用聚酯砂浆或107胶水泥净浆进行粘贴施工。

3）具有良好的耐酸碱、耐腐蚀性和抗污染性。

4）会老化。树脂型人造石在大气中长期受到阳光、空气、热量、水分等的综合作用后，随着时间的延长，会逐渐产生老化。老化后，表面将失去光泽，颜色变暗，从而降低其装饰效果。

5）可加工性好，比天然石材易于锯切、钻孔。

5.6.4 复合型人造饰面石材

这种人造石材具备了上述两类的特点，是采用无机和有机两类胶凝材料。先用无机胶凝材料（各类水泥或石膏）将填料粘结成型，再将所成的坯体浸渍于有机单体中（苯乙烯、甲基丙烯酸甲酯、醋酸乙烯、丙烯腈等），使其在一定的条件下聚合而成。

5.6.5 烧结型人造饰面石材

该种人造石材的制造与陶瓷等烧土制品的生产工艺类似，是将斜长石、石英、辉石、方解石粉和赤铁矿粉及部分高岭土按比例混合（一般配比为粘土40%，石粉60%），制备坯料，用半干压法成型，经窑炉1000℃左右的高温焙烧而成。该种人造石材因采用高温焙烧，所以能耗大，造价较高，实际应用得较少。

人造饰面石材可用于室内外墙面、地面、柱面、楼梯面板、服务台面等部位。

5.7 石材的天然放射性

天然石材中的放射性是引起人们普遍关注的问题。其实地球自形成之日起就具有放射性，作为天然产物的石材有放射性也是事实。在天然“放射性元素”中，人们常说的放射能量最大的是铀、钍和镭，其次有钾－40，铷和钯。这6种天然放射性元素是构成地球和宇宙自然界一切物质的组成部分（当然很微量），无论是在各类岩石和土壤中，还是在一切江河湖海的水中和大气中，都有不同数量的放射性元素存在。在人类和一切生命所赖以生存的地球的成分中，本来就始终存在着天然的放射性物质。但是它并没有阻挡住万物的生存发展和人类的繁衍生息。自然界天然存在的低浓度的放射性辐射不但不会危害人类健康，而且已经是大自然平衡系统的组成部分，人类和一切生命已经完全适应了这个平衡系统的生存环境，如果破坏了这个平衡系统，可能反而对人类带来不利的影响。相反，放射元素在许多方面，如空间技术、原子能核电站、同位素技术、医疗技术、生物技术等发挥着越来越重要的作用，因此，我们大可不必谈“放射”色变。

地球上的放射性主要由地壳上岩石圈的铀系、钍系和锕系矿岩中分别衰变出的氡组成，也就是“氡气”，氡是一种无色、无味，感官不能觉察到的气体，特别是易在通风不良的地方聚集，可使肺、血液、呼吸道发生病变。高层次的宇宙射线由于受到大气层的阻隔，对地球表面影响不大。而我们生活中的其他放射性现象这里姑且不谈。像放射性同位素、X光等，其他还有很多，单就地球岩石中也就是低空的辐射来说，主要衰变出三种氡气，即氡222（222Rn）、氡220（220Rn）、氡210（210Rn）。它们的半衰时间分别为3.83天、55.6s、3.96s。所谓对人类有伤害的花岗石，主要是指衰变时间相对长的氡222。

科学表明，一定剂量下的辐射不会对人和自然界产生伤害，人们反而可以合理利用它造福人类，促进社会发展。如果放射性超过一定剂量且时间过长，势必造成伤害，这里关键是一个量的问题。

关于放射性剂量问题，很早以前就引起世界各国的重视和研究。根据联合国原子能辐射效应科学委员会1988年统计，全人类所受辐射剂量当量，每年每人平均在3.4msv（剂量当量），其中来自大自然的辐射2.4msv，为70.6%，人为的只有1.0msv，占29.4%。可见人类接受辐射的比例主要是大自然。

通过对天然石材的放射性元素与地壳中的放射性元素的平均含量进行对比（表5-7），由其含量的多少就可以判定各类石材中辐射强度的大小。只要不超过地壳中的平均含量就不会对人类健康造成影响。从各类天然石材中的平均含量我们可以发现：①如上所述，无论是在各种石材中，还是在陆地或海洋中都存在着一定数量的放射性元素（微量的）；②由沉积生成的大理石类和板石类中的放射性元素含量，一般都低于地壳平均含量（其中只有少量的黑色板石可能稍高于地壳平均

值）；③在火成的花岗岩类中，暗色系列的（包括黑色系列、蓝色系列和暗色的绿色系列）花岗岩和浅色系列中的灰色系列花岗岩，其放射性元素含量也都低于地壳平均值；④只有浅色系列中真正的花岗岩类和由火成岩变质形成的片麻状花岗岩及花岗片麻岩等（包括白色系列、红色系列、浅色的绿色系列和花斑系列），其放射性元素含量稍高于地壳平均值的含量。所以从表5-7中可知，在全部天然装饰石材中，大理石类、绝大多数的板石类、暗色系列（包括黑色、蓝色、暗色中的绿色）和灰色系列的花岗岩类，其放射性辐射强度都小。

表5-7 放射性元素在各类天然石材中的含量与地壳平均含量对比简表

（单位：克拉克值）

放射性元素	地壳中平均含量（克拉克值：重量百分数）	火成岩及变质岩的平均含量				（沉积）变质岩类的平均含量		土壤中的平均含量
		淡色系列花岗岩		暗色系列花岗岩				
		花岗岩类（白色、绿色、红色和花斑系列等）	闪长岩类（灰色系列）	玄武岩、辉长岩类	超基性岩、蛇纹岩类	大理石类	板石类	
铀	2×10^{-4}	3.5×10^{-4}	1.8×10^{-4}	8×10^{-5}	3×10^{-6}	很微量	3.2×10^{-4}	1×10^{-4}
钍	1×10^{-3}	1.8×10^{-3}	7×10^{-4}	6×10^{-4}	3×10^{-4}	很微量	1.1×10^{-4}	6×10^{-4}

对于浅色系列中的白色、红色、绿色和花斑系列的花岗岩，也不能笼统地认为放射性辐射强度都大，而是只有在以下几种情况下，其放射性辐射强度才有可能偏大：

1）白色花岗岩类，主要是花岗岩类中的白岗岩。白岗岩是在地下岩浆冷凝的后期阶段生成的，它的主要成分是二氧化硅（SiO_2，即石英），在岩石中高达73%～77%。这种岩石生成的阶段（即岩浆冷凝的后期阶段）恰好也是地下岩浆中的铀、钍、铷、铯、钾等放射性元素相对聚集的阶段。由于一切元素（包括放射性元素）在地球中的分布都是极不均匀的，如果恰好遇到某一地区的放射元素分布相对稍多（地质上称为“本底偏高”）时，那么这个地区出产的白岗岩的放射性辐射强度就有可能偏大。

2）红色花岗岩类，含钾的矿物钾长石是红色花岗岩的主要成分，而钾元素中的同位素钾-40（40K）本身就是放射性元素。所以含钾矿物（呈浅粉色、粉红色）越多，其辐射强度有可能越偏高（大）。此外，在红色花岗岩类中，包括了片麻状花岗岩和花岗片麻岩。这种在距今二三十亿年前生成的古老岩石中，不仅含钾长石多，而且有时还含一种颜色美丽的（紫红色、绛红色、紫色等）特殊矿物——锆石（$Zr-SiO_4$）。锆石矿物中常混有铀、钍等放射性元素，从而使花岗岩的红色更加鲜艳华贵的同时，随之也提高了辐射强度，这就是著名的印度红和南非红辐射强度偏高的原因所在。

3）在浅色系列的绿色花岗岩中，有时含一种颜色鲜艳美丽的绿色、翠绿色、

蓝绿色的特殊矿物——天河石。天河石本身就是由弱放射性元素钾、铷、铯组成，因此含有这种矿物的名贵绿色花岗岩，其辐射强度可能偏大。

4）对于花斑系列的花岗岩，由于常有含钾的矿物和石英等其他矿物组成“大斑晶”，构成漂亮的斑状花岗岩，所以其辐射强度也有可能偏大。

由上述可知，在全部浅色系列的花岗岩中，只有“本底偏高”地区的白岗岩、含钾长石矿物多（特别是含钾 -40 同位素多）的花岗岩、含锆石矿物的（古老）变质岩和含天河石矿物的花岗岩，才有可能形成放射性辐射强度偏大和可能有一定的危害现象。而这一部分花岗岩在全部浅色系列的花岗岩中所占的数量是比较少的（约占 20% ~25%），所以对大部分淡色花岗岩仍可以放心大胆地使用。

那么为什么少量黑色板石的放射性辐射强度也有可能偏大（偏高）呢？这是因为，板石类石材都是由江、河、湖泊、海洋中沉积的泥质岩石变化成的，其中黑色板石中含有较多的碳质成分。碳质和泥质在水中有较强的吸附力和粘结力，将水中各种方向放射性物质和各种杂质都吸附到自身，从而使某些黑色板石的辐射强度可能偏大。

我们通常所说的放射性危害主要是指放射性元素衰变过程中产生的“氡”。氡是一种放射性气体，如果人长期生活在氡浓度过高的环境中，氡经呼吸道沉积在肺中，尤其是气管、支气管中，并大量放出放射线，从而危害人类健康，自然也有极少的情况是由于石材本身的放射性而直接影响人体健康。而“过高浓度”的环境是致病的主要原因，欧洲早在 1937 年就发现矿工的肺病发病率是普通人的 28.7 倍。美国在二次大战后采取措施，人为控制了矿井的氡浓度，矿工发病率较低，有 3 年工龄的 907 名矿工调查发现 3 人有肺病。这说明只要人为加以控制，氡的危害完全可以降低到最低程度。而更为人们所熟视无睹的是土壤也释放“氡”。美国曾对国土资源进行过有关调查，并划定了 32 个地区是不适宜居住的，而这些地区中有的早就建立了城市或居民区。我国广东省阳江地区，放射性辐射指标达到了 3.3msv，卫生部跟踪调查了 26 年，并未发现该地区的发病率比其他地区高。所以说正常的放射性影响并不可怕，人们在医疗过程中接受一次 X 光透视的辐射剂量就等于几年自然辐射总和，比起阳光的辐射要大得多，也未见对人们产生多大的影响。

对于人们正常情况下每年受到辐射的总剂量控制，我国标准规定不超过 1msv，一定量的放射性对人体的危害和空气中细菌对人体的危害是一样的，正常情况下人体的新陈代谢功能完全能够适应，不产生生理病变。绝大部分的天然石材（约 85%）的放射性辐射强度都较小，对人体没有危害。只有少量含某些特殊成分的天然石材放射性可能偏大。而我国石材放射性标准在制定时已充分考虑到保障人民身体健康，在总的辐射剂量 1msv 的控制前提下，扣除自然界以及其他材料的放射性后，划分了 A，B，C 三类。我国的标准远低于国际放射防护委员会规定的 100Bq/m^2 标准，比美国的相应标准还要严格。

按所产生的氡气引起的辐射来定，A 类产品的规定是 70Bq/m^2，可以使用于任何地方；B 类产品是 90Bq/m^2，可用于除居室内饰面以外的一切建筑物的内外饰面材料；至于 C 类产品仅用作建筑物的外饰面材料和工业用途。在装饰装潢中，重要的是一定要避免将 C 类产品用于室内（尤其是百姓居家中）。

人们居住的环境，正常情况下氡浓度是可以忽视的。特别要指出的是，千万不可把室内的放射性污染全归罪于天然石材。实际上，居室内氡气的主要来源是土壤中存在的氡气不断向外微量释放，因此平房、楼房的地下室和半地下室内氡气含量相对较高，而且在使用煤灰渣烧制成的墙体砖体中，其放射性物质的含量往往比某些特殊矿物的花岗岩放射性含量还要高。各种家电（电视、电脑、电冰箱、微波炉等）都在不停地释放少量辐射。另外，室内装修中使用的各种化学物质的涂料、装饰材料中，都会不断地释放出一些有害气体，尤其是甲醛和苯类对人类的伤害最大。相比起来石材释放出的氡气所占的比例仅为 2%，可以说微不足道。即使在居室中已经装饰了 B 类产品，氡浓度也不一定会增高多少。因为标准测试时用的是 4m×4m×0.5m 的样品，而居室装修用的石材厚度仅 10～20cm，放射性会大打折扣。清除室内一切污染物质的最有效、最简单的方法是加强室内通风，测试表明：一间将门窗完全关闭一夜的居室中氡气含量高达 151Bq/m^2，经过开窗通风 1h 后，氡的含量下降到 48Bq/m^2，完全符合 A 类产品 ≤70Bq/m^2 的标准。因此，每天起床后和睡前开窗 0.5～1h，就可确保全家人的身体安全。如果担心 C 类产品用在家居中，可用“石材放射性探测仪”检测石材板材中放射性物质的具体含量。台湾石材工业发展中心组织专家按随机原则，抽样检测花岗石、大理石近 200 个品种。结果均在安全使用范围内，故告之消费者可以放心使用。我国 1993 年制定《天然石材产品放射性防护分类控制标准》时，曾对国内数十家有代表性的矿山进行系统采样、测试，结果也没有发现超出国际和国家标准的石材。这表明：石材和地球上其他含有放射性物质一样，只要不超剂量，均可作为安全材料使用。

我国目前上千种石材品种，至今还没有发现致人伤害的，经检验，绝大多数天然石材中所含放射物质极微，不会对人体造成任何危害。但部分花岗石产品放射性指标超标，会在长期使用过程中对环境造成污染，因此有必要给予控制。国家建材局发布的《天然石材产品放射性分类控制标准》（JC 518—13）中规定，天然石材产品（花岗石和部分大理石），根据镭当量浓度和放射性活度限值分为三类：A 类产品不受使用限制；B 类产品不可用于居室的内饰面，但可用于其他一切建筑物的内外饰面；C 类产品只可用于一切建筑物的外饰面。

放射性水平超过此限值的花岗石和大理石产品，其中的镭、钍等放射元素衰变过程中将生成天然放射性气体氡。

目前国内使用的众多天然石材产品，大部分是符合 A 类产品要求的，总体上来说，我国的大理石，板岩放射性极低，属于 A 类产品，花岗石绝大多数属于 A 类产品，其余也基本是 B 类，因此人们完全可以放心使用，但不排除有少量的 C

类产品。因此装饰工程应选用经放射性测试，且发放了放射性产品合格证的产品。此外，在使用过程中，还应经常打开居室门窗，促进室内空气流通，使氡稀释，达到减少污染的目的。

另外，我国本来就不属于放射性矿物资源富有的国家，尤其是几个石材生产大省，更是放射性资源贫乏区，就目前石材矿山开采水平看，大多处于打眼、放炮、轰山等原始的开采阶段：古老的开采方法对石材资源破坏率低，只能开采一些表面露头矿脉，很难立体开采和深层次开采，而这些露头矿，由于千万年的裸露、风化，氡的含量少了很多，故远远低于标准。

石材一般装饰在公共场合的大厅、门厅等空间较大、空气流通、人口流动快的环境中，这样的条件，即使有些很小的放射性也会很快衰减。所以，人为的装饰根本不会造成对人的伤害。

至于居室装修，由于仅仅是地面，墙面、顶棚很少，对人没有形成封闭的空间，因而也不会造成危害。

科学试验表明：绝大多数花岗石放射性很低，不但不会伤人，反而可以起到保护人类的作用，如当土壤、水源、燃料及其他建筑中的氡气析出高于花岗石时，用花岗石装修可以有效地屏蔽它们的“毒物”溢出，其实，建筑内的氡气产生并不能全都怪罪于花岗石，像土地、燃料、矿物等许多材料都有氡气产生，这些都应该引起注意。

第6章　玻　　璃

6.1　概述

玻璃是由硅砂（或称石英砂）、纯碱、石灰石、长石（钾长石、钠长石、钙长石等）以及碎玻璃等为主要原料经高温炉（约1600℃）熔融、凝固而成的非晶态固体物质。它是物质处于玻璃态的一种无机材料。玻璃态是熔融物冷却到室温还保持熔体结构的固态物质。因此，玻璃可视为一种物质的状态（即玻璃态），一种材料（如平板玻璃）或一种制品（玻璃纤维）。

广义的玻璃包括单质玻璃（如Se、Ge、Bi等）、无机玻璃和有机玻璃。狭义的玻璃仅指无机玻璃，根据所用原料及化学成分不同，无机玻璃可分为以二氧化硅为主要成分的硅酸盐玻璃；以三氧化二硼为主要成分的硼酸盐玻璃；以二氧化硅和适当含量的三氧化二硼为主要成分的硼硅酸盐玻璃；以二氧化硅和三氧化二铝为主要成分的铝硅酸盐玻璃以及五氧化二磷为主要成分的磷酸盐玻璃；此外还有分别以B_2O_3、P_2O_5、PbO、Al_2O_3、GeO_2、TiO_2和V_2O_5为主要成分的氧化物玻璃；以硫化物（如As_2S_3）或卤化物（如BeF_2）为主的非氧化物玻璃等。在元素周期表中一些单质、氧化物和盐类都可形成玻璃或玻璃的组成。其中以各种盐类的玻璃最为普遍。在各种固体材料中，玻璃的显著特点在于通过化学成分的调整、各种表面处理和热处理技术来大幅度调整玻璃的各种性能，还可通过粉末烧结法等加工方法制备形状复杂、尺寸精确的器件，以不断拓宽玻璃的应用领域。

在现代工业中玻璃不仅是传统的采光和装饰材料，还是一种功能和结构材料。例如现代建筑中越来越多地采用大面积的窗玻璃和玻璃墙体（或玻璃幕墙），甚至采用双层中空玻璃、吸热玻璃和热反射玻璃等；又如在自动化通信中采用的玻璃型光纤，可以实现大容量、高敏、抗干扰及保密性好等现代化通信要求；又如高纯涂层石英玻璃和低碱石英玻璃可用于半导体工业。再如钠钙硅玻璃与其他玻璃相比，CaO、Na_2O的含量较高，而且最易成型加工，成本低，通常用于耐热性和耐化学性能无特殊要求的场合。目前作为主要玻璃包装容器的玻璃瓶、罐以及其他玻璃器皿、平板玻璃等均采用此种玻璃。铅玻璃是PbO成分较多的一种光学玻璃，具有较高的光折射率，通常作为照明灯管使用。硼硅酸玻璃是一种含B_2O_3成分较多的中性硬质耐热玻璃。它具有耐化学性好、热胀系数低的特点，主要用来制作医用注射药的小玻璃瓶及其他玻璃仪器等。目前，玻璃已广泛用于建筑、轻工、交通、化工、医药、电子、航天和原子能等方面。

玻璃材料的优点如下：

1）光亮、透明、美观。

2）原料来源丰富，价格便宜，加工方便，品种形状多样，可回收及重复使用。

3）无毒无味，化学稳定性极好，卫生清洁，阻隔性能极好。

4）耐热、耐压、耐清洗，可耐高温和低温。

玻璃材料的缺点为：重量大，运输费用高；脆性大，易破碎，加工能耗大；印刷等二次加工性差。这些缺点在很大程度上影响着玻璃材料的使用和发展，特别是受到质轻的塑料及其复合材料的冲击。然而，由于近年来玻璃材料的高强度，轻量化方面得到很大发展，特别是玻璃所具有的其他材料无法替代的特性，使玻璃的用量仍然很大。

6.2 玻璃的化学组成

玻璃的化学组成，是指该玻璃是由何种氧化物和其他辅助原料所组成。玻璃的组成是决定玻璃物理化学性质和生产工艺的主要因素，所以经常借助调整玻璃的组成，来改变玻璃的性质，使之适应生产工艺条件和满足制品的使用要求。玻璃的组成以各种元素的氧化物表示，由于氧化物性质不同，工业玻璃分为硅酸盐玻璃（以 SiO_2 为结构氧化物）、硼酸盐玻璃（以 B_2O_3 为结构氧化物）、硼硅酸盐玻璃（以 SiO_2、B_2O_3 为结构氧化物）等。工业上大规模生产的是硅酸盐玻璃。

按玻璃组成氧化物在玻璃结构中的作用，可分为玻璃形成氧化物、中间体氧化物和网络外体氧化物三类。

（1）玻璃形成氧化物　为二氧化硅（SiO_2）和氧化硼（B_2O_3）。单独的二氧化硅可以制成石英玻璃。在一般玻璃中，二氧化硅以硅氧四面体［SiO_4］结构单元形成结构网络。二氧化硅能降低玻璃的热胀系数、密度，提高玻璃的热稳定性、化学稳定性、粘度、机械强度等，但含量高，需要较高的熔融温度。一般玻璃二氧化硅含量为 73% 左右。

氧化硼也可以单独形成玻璃，它以硼氧三角体［BO_3］和硼氧四面体［BO_4］为结构单元。在硼硅酸盐玻璃中与硅氧四面体共同组成结构网络。氧化硼能降低玻璃的热胀系数，提高玻璃的化学稳定性和热稳定性，改善玻璃的光泽，提高玻璃的机械强度。氧化硼在高温时，降低玻璃的粘度；在低温时则增加玻璃的粘度。少量的氧化硼有助熔作用，加速玻璃的澄清，降低玻璃的结晶能力。当氧化硼引入量高时，由于结构中［BO_3］量增多，玻璃的热胀系数反而增大，发生反常现象。

（2）中间体氧化物　自身不能形成玻璃，但可以连接 SiO_2（玻璃）链使其保持玻璃态。例如加入大量的氧化铅（最高达 60%）能产生一种灿烂发光的装饰玻璃。中间体氧化物不但能变为玻璃网络结构中的一部分，而且可改进结构内部的位置。中间体氧化物主要有氧化铝（Al_2O_3）、氧化铅（PbO）、氧化锌（ZnO）等。

当玻璃中游离氧多时，氧化铝和氧化锌分别形成铝氧四面体［AlO_4］和锌氧四面体［ZnO_4］，与硅氧四面体组成连续的网络结构。当玻璃中游离氧少时，它们又分别形成铝氧八面体［AlO_8］和锌氧八面体［ZnO_8］居于网络之外。它们都能降低玻璃的热胀系数，提高玻璃的热稳定性、化学稳定性、机械强度和粘度，但用量不宜过多。

（3）网络外体氧化物—改性剂　这种氧化物不参加玻璃的结构网络，居于网络之外，但能促使玻璃网络破裂而改变玻璃的性质。因此有时也称网络外体氧化物为玻璃改性剂。其主要氧化物有：氧化锂（Li_2O）、氧化钠（Na_2O）、氧化钾（K_2O）、氧化镁（MgO）、氧化钡（BaO）等。但网络外体氧化物只能加入适当的量，这样可以降低熔点和简化工艺。

表6-1列出了几种常用玻璃的化学组成。

表6-1　几种常用玻璃的化学组成（%）

名称	SiO_2	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	B_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	PbO
钠钙玻璃	72.5	13.0	0.3	9.3	3.0	—	1.5	1.5	—
硼硅玻璃	80.6	4.2	—	0.1	0.05	12.6	2.2	0.05	—
铅钾玻璃	63.0	7.6	6.0	0.3	0.2	0.2	0.6	—	21
铅玻璃	30.0	—	3.0	—	—	—	—	—	65.0
铝镁玻璃	53.3	0.6	0.4	4.7	8.5	7.5	23.0	—	1

6.2.1　钠钙玻璃

它是由 SiO_2、Na_2O、CaO 为主要组成的玻璃。它的软化温度较低，易于熔制，但杂质较多，制品多呈绿色。其力学性质、耐热性、光学性质及化学稳定性均较差。多用于制造平板玻璃、瓶罐玻璃、灯泡玻璃等。

6.2.2　铅钾玻璃

它是以 K_2O 代替钠钙玻璃中的部分 Na_2O，并增加 PbO 组分的玻璃。具有高的折射率、介电常数、相体积电阻率等，其性能较钠钙玻璃为好，可制造高级玻璃制品等。

6.2.3　铅玻璃

它是由 PbO、SiO_2 和少量 K_2O 组成的玻璃，光泽透明、折光性好、质软易加工、化学稳定性好。用于制造光学玻璃、电真空玻璃和防辐射玻璃。

6.2.4　镁铝玻璃

引入 MgO 并以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主要组成的玻璃。其中 Al_2O_3 可达20%以上，

具有较好的化学稳定性、电绝缘性、机械强度、较低的热胀系数，但高温粘度较大，熔制温度较高。主要用于制造无碱玻璃纤维、化工玻璃管道、水表玻璃等。

6.2.5 硼硅玻璃

它是由 B_2O_3、SiO_2 和少量 MgO 组成的玻璃。具有较好的光泽和透明性、较高的强度、耐热性、绝缘性和化学稳定性，主要用于制备光学玻璃、耐热玻璃、高级化学仪器和绝缘材料等。

6.3 玻璃的生产

6.3.1 玻璃原料

制造玻璃的原料分为主要原料和辅助原料两大类。主要原料是引入各种玻璃组成氧化物的原料，如石英砂、长石、石灰石、白云石、纯碱等，它们决定了玻璃的物理、化学性质。辅助原料是使玻璃获得某些特殊性质和加速熔制过程的原料，它们的用量较少，起脱色剂、着色剂、助溶剂、乳浊剂、氧化剂、还原剂及澄清剂等重要作用，如二氧化锑、硝酸钠、芒硝、萤石、炭粉、氯化钠、着色剂、脱色剂及碎玻璃等。

1. 氧化物

（1）酸性氧化物　主要有二氧化硅和三氧化二硼。二氧化硅是硅酸盐玻璃的形成物，在玻璃中起骨架作用，也可单独形成石英玻璃。但因其熔化温度过高，粘度过大，一般玻璃中均加入其他氧化物形成多组分硅酸盐玻璃。石英可增加玻璃的化学稳定性、热稳定性、机械强度、粘度，降低玻璃的热胀系数。三氧化二硼是玻璃中常用的组分，也是硼硅酸盐玻璃、耐热玻璃和光学玻璃等的基础组成。

在普通硅酸盐玻璃中，用 1% B_2O_3 代替 SiO_2，可提高熔化速度，有利澄清，并降低失透作用，如用 15% 以下的 B_2O_3 代替 R_2O 可以显著降低玻璃的热胀系数，提高热稳定性、化学稳定性和机械强度等。

（2）碱性氧化物　主要有氧化钠和氧化钾。Na_2O 主要用来降低玻璃的熔化温度、粘度相，减少析晶倾向，但它显著降低玻璃的化学稳定性，提高玻璃的导电性、介质损耗和热胀系数，加 K_2O 代替或部分代替 Na_2O 能增加玻璃的光泽、透光度、粘度，降低析晶倾向并使玻璃形成温度范围增大。因此，玻璃生产中如采用混合碱（$Na_2O + K_2O$）比单一碱具有低的导电性、介质损耗和良好的化学稳定性。

（3）增强氧化物　主要有氧化钙、氧化镁、氧化钡、氧化锌、三氧化二铝和氧化铅等。在硅酸盐玻璃中。CaO 能提高玻璃的化学稳定性（特别是耐水性）、机械强度、硬度，还可降低高温粘度，有利于熔化和澄清，低温时则增加粘度，加快玻璃硬化速度；用少量 MgO 代替 CaO 可降低析晶倾向，并可加速硅酸盐的形成；

用 ZnO 代替 CaO，能降低玻璃的热胀系数、析晶温度和高温粘度；以 BaO 代替 CaO，能增加玻璃的光泽、折射率、密度、体积电阻率；Al_2O_3 可提高玻璃的热稳定性、化学稳定性、机械强度、退火温度；PbO 是玻璃的重要组分，含量少的 PbO 为网络调整构，含量多时可进入网络结构中形成玻璃形成物。

各种氧化物对玻璃的作用见表 6-2。

表 6-2　各种氧化物对玻璃的作用

名称	加入目的	
	降低	增加
氧化硅	密度	熔融温度、化学稳定性、热稳定性、机械强度、退火温度
氧化硼	熔融温度、韧性、析晶性	化学稳定性、热稳定性、光泽、折射率
氧化钙	热稳定性	化学稳定性、机械强度、硬度、析晶性、退火温度
氧化镁	析晶性、韧性	耐热性、化学稳定性、机械强度、退火温度
氧化铝	析晶性	熔融温度、化学稳定性、机械强度、韧性
氧化钡	熔融温度、化学稳定性	密度、光泽、折射率、析晶性
氧化锌	热胀系数	热稳定性、化学稳定性、熔融温度
氧化铅	熔融温度、化学稳定性	密度、光泽、折射率
氧化钠	化学稳定性、热稳定性、熔融温度、析晶倾向、退火温度、韧性	热胀系数、介电常数、表面导电性
氧化钾	同氧化钠	光泽，其他同氧化钠

2. 辅助原料

（1）助熔剂　为了促进玻璃原料在尽可能低的温度下和规定的时间内完成熔化过程，同时又不改变玻璃组成，常在玻璃熔制时加入少量助熔剂，使之首先熔融成为液相，然后与其他原料一起与 SiO_2 反应生成硅酸盐玻璃。熔制普通玻璃时，除纯碱是良好的助熔剂外，还常使用硝酸钠、芒硝、硫酸铵、硝酸钾、萤石、硼砂等助熔剂。

（2）脱色剂　为了减弱铁化合物等杂质所产生的颜色，常使用不同的脱色剂，根据其作用的不同可分为化学脱色剂和物理脱色剂。常用的化学脱色剂有硝酸盐，三氧化二砷、三氧化二锑、二氧化铈及氟化物等，它们与着色杂质形成化合物，如着色强烈的 FeO（呈青绿色）氧化而成 Fe_2O_3（呈黄绿色），增加玻璃的透光度。常用的物理脱色剂有硒、氧化钴、二氧化锰、氧化镍等，它们本身是着色剂，在玻璃中产生与绿色或黄绿色的互补色，起到消色效果，但玻璃总的透光度降低。

（3）着色剂　为使玻璃呈现各种颜色，常用一些着色剂，它们多为某些金属的氧化物，如 Fe_2O_3 能使玻璃呈现黄色或绿色，MnO 能呈现紫色，CoO 能呈现蓝色，NiO 能呈现棕色，CuO 和 Cr_2O_3 能呈现绿色等。这些氧化物中的金属是过渡元

素，它们在玻璃中以离子状态存在，这些离子中的 4d 电子在可见光的激发下跃迁到较高能态上，因而吸收一定波长光波的能量，此能量为可见光的某一段波长，结果使玻璃呈色。金、银、硒、硫等着色剂，在玻璃中以胶体状态存在，按照胶体粒子的大小，对不同波长的入射光产生不同的反射，而使玻璃呈色。例如银的胶体使玻璃呈现黄色。

（4）澄清剂　能在高温时分解或气化而放出大量气体，从而促进玻璃中气泡的排除。澄清剂所放出的大量气体进入玻璃液相气泡中，降低了各种气体的分压，使溶解在玻璃中的气体易进入气泡，促进气泡长大，逐渐漂浮于玻璃表面最终从玻璃溶液排出。大气泡上升的同时也能局部带动小气泡上升，达到澄清的作用。常用的澄清剂有三氧化二砷、三氧化二锑、硝酸盐、硫酸钠、二氧化铈及铵盐等。

（5）乳浊剂　为使玻璃呈乳白状的不透明体。常使用氟化物或磷酸盐等乳浊剂，如氟化钙、氟硅酸钠、冰晶石、磷酸钙等。它们在玻璃中形成胶体微粒，因而呈现光漫射，使玻璃呈不透明乳浊状。

（6）氧化剂　通过氧化反应使玻璃中的 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 而脱色，也可使某些着色剂保持高价态而使玻璃呈现一定颜色。常用的氧化剂有硝酸钠、硝酸钾、三氧化二砷、二氧化铈等。

（7）还原剂　通过还原剂反应使玻璃中的着色剂保持低价态或原子态而呈现一定颜色，如 Cu^{2+} 呈铜红。常用的还原剂有焦炭、木屑、酒石酸、锡化合物、铝粉及硅粉等。三氧化二砷对某些着色剂为良好的还原剂。

3. 碎玻璃

又称熟料。玻璃生产中的废品和切裁后的边角料，通常作为原料与配合料按比例混合或分别投入熔窑。其作用不仅是利用废品，还能加速玻璃熔融，降低能耗等。碎玻璃加入量为 15% ~30% 。加入量过多，玻璃熔液粘度增加，不利澄清。

6.3.2　玻璃熔制

玻璃的熔制工艺是生产玻璃过程中最为关键的一环，其目的是将配合料经过高温加热，形成均匀的无气泡（即把气泡、条纹和结石缺陷减少到容许的限度），并符合成型要求的玻璃液。玻璃熔制是一个非常复杂的过程，它包括一系列物理的、化学的、物理化学的变化和反应。通过这些变化和反应，使均匀混合的配料形成复杂的熔融物即玻璃液。

玻璃的熔制是在耐火砖砌筑的玻璃池窑里进行，先将炉窑加热至 1250 ~ 1300℃，加入碎玻璃使壁上覆上一层熔化的玻璃粘液，然后将制备的粉料逐渐送入炉窑，缓慢加热至 1450 ~ 1500℃，使玻璃配合料熔融成无固体颗粒的玻璃液，此时进行热分解产生的 SO_3、SO_2、CO_2 及化学结晶水等气体挥发，初期为液相和其熔体的形成以及固相反应和固相溶解等一系列物理和物理化学反应。玻璃在熔制过程中形成硅酸盐熔液，在澄清剂作用下，使玻璃液排出气体夹杂物，进行澄清和匀

化，最后将玻璃液放入冷却池中冷却。玻璃熔制除温度外还取决于配合料的组成、颗粒大小、混合均匀度、助熔剂的选用以及碎玻璃加入量等因素。

以上熔制过程，大致分为五个阶段：硅酸盐形成、玻璃形成、澄清、均化和冷却。

（1）硅酸盐形成　在很大程度上是在固体状态下进行的，配合料中的各组分在加热中经过一系列的物理和化学变化，结束了主要的固相反应，大部分气态产物逸散。到达一阶段结束时，配合料变成了由硅酸盐和 SiO_2 组成的不透明烧结物。对于普通的硅酸盐玻璃，这一阶段约在 800～900℃时基本结束。

（2）玻璃形成　烧结物继续加热时即开始熔融。易熔的低共熔混合物首先开始熔化，原先形成的硅酸盐与 SiO_2 相互扩散与溶解。这一阶段结束时，烧结物变成了透明体，再没有未起反应的配合料颗粒。但此时的玻璃带有大量的气泡、条纹，在玻璃液的化学成分上是不均匀的。对于普通的玻璃——钠钙玻璃而言，此阶段于1200℃左右结束。

（3）玻璃液的澄清　玻璃液继续加热，其粘度进一步降低，并放出玻璃中的气体，到可见气泡基本排除。对通常的钠钙玻璃而言，其澄清温度为 1400～1500℃，粘度为 10Pa·s。

（4）玻璃的均化　当玻璃液长时间处于高温，其化学组成就趋向均化。玻璃液中的条纹由于扩散、溶解而清除。熔制普通玻璃时，均化可在低于澄清温度下完成。

（5）玻璃液的冷却　将已澄清和均化的玻璃液降温，使玻璃液具有成型所需的粘度，在冷却阶段，应以不损坏玻璃的质量为前提。

玻璃熔制过程的五个阶段，互不相同、各有特点，但又彼此密切联系和相互影响。在实际熔制过程中，常常是同时进行或交错进行的。熔制的五个阶段，在熔炉中是在不同空间，同一时间内进行。在坩埚炉中是在同一空间不同时间内进行。

6.3.3 玻璃成型

1. 玻璃的主要成型性质

（1）玻璃的粘度　在玻璃成型中，玻璃的粘度起着十分重要的作用。玻璃的粘度随温度下降而增大的特性，是玻璃制品成型和定型的基础。在1000℃左右玻璃粘度增加很快，即粘度的温度梯度突然增大。在这一区域玻璃具有自动定型的某种速度。玻璃的粘度温度梯度大的，称短性玻璃；反之称长性玻璃。不同组成的玻璃具有不同的粘度——温度特性。

玻璃的粘度越小，流变性就越大。通过温度的控制，改变玻璃的粘度，即改进玻璃的流变性，以达到成型和定型。

利用粘度的可逆性，可在成型过程中多次对玻璃进行加热，使之反复达到所需要的成型粘度，以制造形状复杂的制品。在吹制成型中，粘度还可以自动调节制品

壁的厚薄。

（2）玻璃的表面张力　表面张力表示表面的自由能，使表面有尽量缩小的倾向，因而使自由的玻璃液滴成为球形。随着温度降低，其表面张力增大，但变化较小。在高温时，如在粘度 $10^3 \sim 10^4$ Pa·s 时，玻璃的表面张力对成型影响较大，而在低温时，对成型的影响不大。

（3）玻璃的弹性、比热容、热导率、热膨胀和透热性　玻璃由液体变为弹性材料的范围，称为粘弹性范围。对于玻璃来说，粘度在 $10^5 \sim 10^{14}$ Pa·s 之间为粘弹性材料，粘度为 10^{15} Pa·s 以上为弹性固体。所以粘度在 $10^5 \sim 10^6$ Pa·s 时，已存在弹性作用了。在成型过程中，如果维持玻璃为粘滞性状态，不管如何调节玻璃的流动，都不会产生微裂纹等缺陷。在大多数成型过程中，可能已达到了弹性发生作用的温度，至少在制品的某些部位或某些部分已接近这样的温度。因此在成型操作中，弹性作用以及消除弹性影响所需要的时间是要引起注意的。

玻璃的热性质，是成型过程中影响热传递的重要因素，对玻璃的冷却和硬化速度以及成型温度的制订关系极大。

玻璃的比热容决定着成型过程中需要放出的热量。热导率、表面辐射强度和透热性越大，玻璃的冷却速度越快，成型的速度也越快。

玻璃的热膨胀性质，对玻璃中应力的产生和制品尺寸的公差都有很大关系。在成型时，玻璃与模壁表面接触因冷却而发生收缩，在最冷点上，玻璃表面上收缩量最大，这样在玻璃表面上存在张应力，但当玻璃部分地到达弹性固体状态的同时，模型表面因受热膨胀，玻璃制品的收缩和模型的膨胀有 1% ~2% 的差值，因而导致制品表面裂纹的产生。因此成型中应当考虑玻璃膨胀性质，注意成型时的允许公差及模型尺寸。

2. 异形玻璃制品的成型

异型玻璃制品的成型，是熔融的玻璃液在一定温度范围内转变为具有固定几何形状的玻璃制品的过程。成型时，玻璃液以粘性液态转变为可塑态，最后转变成为脆性固态。这种过程受到传热过程的制约，与玻璃液本身及其周围介质的热物理性质，即比热容、热导率、透热性、传热系数等有关。

玻璃制品的成型过程可分为两个阶段：第一阶段为成型阶段，它赋予制品以一定的几何形状。第二阶段为定型阶段，把制品的形状固定下来。这两个阶段是连续进行的，第二阶段是第一阶段的延续。影响成型的主要因素是玻璃的流变性，即粘度、表面张力、可塑性、弹性及这些性质的温度变化特征，而决定玻璃定型的因素是玻璃的热性质以及在周围介质影响下的玻璃硬化速度。

玻璃制品的成型方法可分为人工成型、半机械化成型或自动化成型。还可以从采用的方法不同分为吹制法、压制法、吹—吹法、压—吹法、吸—吸法等。压制与吹制法广泛应用于玻璃制品制造。它是先将粘性玻璃块放入模子里，并进行压制，然后移去下半个模型，并用最终形状的模型代替，经吹制操作可得到所要求的外

形。局部成型的玻璃称为型坯。

3. 平板玻璃的成型

（1）浇注法 将熔融的玻璃液流到铁板上之后，转动滚筒将玻璃压展成板状，从而得到厚度为4～10mm，宽为5m，长度为20～30m的平板玻璃。

（2）轧制法 用上下一对转动的滚筒，将熔融玻璃沿水平方向引出成型，用这一方法可以成型夹丝玻璃，型板玻璃和波形玻璃等。

（3）引上法 有槽法和无槽法。都是用滚筒将熔融玻璃沿多重方向拉出成型。

（4）浮法 将熔融玻璃从池窑中连续流入，并浮在有还原气氛保护的重金属（锡）液上，由于各物相界面张力和重力的综合作用，摊成厚度均匀、上下表面平行、平整和火抛光的玻璃带，经冷却硬化后脱离金属液，再经退火、切割而得浮法玻璃。

6.3.4 玻璃的退火

玻璃制品在生产过程中，会在冷却后的制品中留下一些残余应力，这种残余应力将降低制品的热稳定性和机械强度。若不经过退火使其自然冷却消除应力，很可能在成型后的冷却、存放以及机械加工的过程中自行破裂。退火就是为了消除或减少玻璃中的残余应力，使其降低到允许范围。退火过程实际上就是按一定规程进行热处理的过程。将成型后的玻璃制品加热到玻璃化转变温度 T_g 附近的某一温度，并在此温度保温一定时间。以使制品各部分的温度均匀，由于玻璃内部微观粘滞性流动的结果，使残余应力消除。这个选定的温度（即保温均热温度），称为退火温度。在退火温度范围内，制品经过几分钟就能消除残余应力的50%～95%。

不同类型的玻璃，由于其玻璃化温度 T_g 不同，其退火温度范围也就不同。对于钠钙玻璃的退火温度为550～600℃。随后在这一温度范围或低于这一温度范围保温一定时间。冷却速率必须非常缓慢，以保持制品不再产生新的应力。

6.4 玻璃制品的二次加工

经退火后的制品大部分可以直接使用，也有部分产品根据用户的不同要求进行二次加工，以改善玻璃的外观和性质。如烧口（如啤酒瓶、汽水瓶等需耐内压力的容器，需对瓶口进行烘烧，以消除微小裂纹，保证密封）、钢化、化学钢化、研磨、抛光、印花等。玻璃制品的二次加工分为冷加工、热加工和表面处理三大类。

6.4.1 冷加工

常温下通过机械方法来改变制品的外形和表面性状，称为冷加工。其基本方法有如下几种。

1. 研磨和抛光

将玻璃制品表面缺陷和成型后残存的凸出部分磨去，使制品具有平整的面、一定的形状和尺寸。如要求密封性好又需常开启的玻璃瓶罐，其瓶口内表面和配用瓶塞外表面，可进行研磨加工。通常用氧化铝或金刚石粉调水或油作研磨介质，在磨口机上进行加工。

开始用粗料研磨，效率高，然后逐级使用细磨料，直至玻璃表面的毛面状态变得较细致，再用抛光材料进行抛光，使毛面玻璃表面变得光滑、透明，并具有光泽。研磨和抛光是两个不同的工序，将这两个工序合起来，俗称磨光。经研磨、抛光后的玻璃制品称磨光玻璃。玻璃磨料的性能见表 6-3。常用抛光材料有红粉、氧化铈、氧化铬、氧化锆、氧化钍等，其性能见表 6-4。

表 6-3 玻璃磨料的性能

名称	组成	密度/（g/cm^3）	莫氏硬度	显微硬度 HV	研磨效率比值
金刚石	C	3.4～3.6	10	1.0×10^6	
刚玉	Al_2O_3	3.9～4.0	9（8）	（2～2.61）$\times10^3$	2～3.5
电熔刚玉	Al_2O_3	3.0～4.0	9	（2～2.61）$\times10^3$	
碳化硅	SiC	3.1～3.39	9.3～9.75	（2.9～3.3）$\times10^3$	
碳化硼	B_4C	2.6	>9.5	（4.8～4.9）$\times10^3$	2.5～4.5
石英砂	SiO_2	2.6	7	（1.0～1.1）$\times10^3$	1

表 6-4 玻璃抛光材料的性能

名称	组成	颜色	密度/（g/cm^3）	莫氏硬度	抛光能力/（mg/min）
红粉	Fe_2O_3	赤褐	5.1～5.2	5.5～5.8	0.58
氧化铈	CeO_2	淡黄	7.8	6	0.88～1.04
氧化铬	Cr_2O_3	绿	5.2	6～7.6	0.28
氧化锆	ZrO^2	白	5.7～6.2	5.5～6.5	0.78
氧化钍	ThO^2	白、褐	9.7	6～7	1.26

光学玻璃和日用玻璃研磨加工余量大，一般用刚玉或天然金刚砂研磨效率高。平板玻璃的研磨加工余量小，但面积大、用量多，一般采用价廉的石英砂。

玻璃抛光材料中使用得最早最广泛的是红粉又称铁红。二氧化铈和二氧化铁的抛光能力比红粉高，由于价格较高，应用上还没有红粉广泛。对抛光材料除了须有较高的抛光能力外，必须不含有硬度大、颗粒大的杂质，以免玻璃表面划伤。

2. 喷砂、切割与钻孔

（1）喷砂　利用高压空气通过喷嘴的细孔时所形成的高速气流，带着细粒的石英砂或金刚砂等喷吹到玻璃表面，使玻璃表面组织不断受到砂粒的冲击破坏，形

成毛面。喷砂面的组织结构决定于气流速度、砂粒硬度，尤其是砂粒的形状和大小。例如细砂粒使表面形成微细组织。用高速细砂流对玻璃制品表面进行加工，使制品表面全部或局部成为半透明的毛面或制成不同的花纹、标签。

（2）切割 利用玻璃抗拉强度小的性质，人为地在玻璃表面上划痕，沿着刻痕施加拉应力或弯曲应力使玻璃断开。平板玻璃的切割多用合金刀轮（如钼钨钴合金）或钻石刀。软质铅玻璃管可用刚玉片切割。为增加切割处应力集中，可在刻痕后用火焰加热，便于切割。对于大块厚玻璃可采用金刚石锯片或碳化硅锯片切割，也可用电热丝在切割处加热，再用水或冷空气使受热处急冷而产生很大的局部应力来形成裂口进行切割。采用此种方法切割时，应考虑玻璃自身的残余应力大小，如玻璃自身应力过大，刻痕时破坏了应力平衡，会导致玻璃破裂。此外，还有等离子切割和电子束切割加工方法。

（3）钻孔 有研磨钻孔、钻床钻孔、冲击钻孔、超声波钻孔等加工方法。

6.4.2 热加工

各种类型的热加工，都必须把玻璃加热到一定的温度。由于玻璃的粘度随温度升高而减小，同时玻璃的导热系数较小，能采取局部加热的方法，使之局部达到变形、软化、甚至熔化流动，以进行切割、钻孔、焊接等加工。玻璃制品的热加工应考虑玻璃的组成与性质。控制适宜的火焰性质与强度，以防止玻璃中的砷、锑、铅等成分被还原而发黑。

（1）烧口 利用玻璃的表面张力大，使玻璃表面趋向平整的作用，可将玻璃制品进行火抛光和烧口。所谓烧口，就是对于盛装酒类、汽水等玻璃瓶和其他玻璃容器进行瓶口火抛光，以提高瓶口质量，消除微裂纹，提高承压能力，易于密封。

（2）焊接 玻璃还可以进行加热焊接，加热焊接时必须使两者的膨胀系数相同或相近等。热加工后的制品，应缓慢冷却，防止炸裂或产生较大的残余应力。对许多制品还必须进行二次退火。

（3）钢化 是将玻璃制品加热到接近玻璃的软化温度，均热，然后快速均匀冷却，使玻璃表面层产生适当的均匀压应力，以提高玻璃的机械强度和热稳定性。也可以将玻璃制品置于熔融的硝酸钾中，让半径较大的钾离子置换玻璃表面层中半径较小的钠离子，使玻璃表面形成均匀的压应力。这两种处理都称为玻璃钢化，前者叫做物理钢化，后者称为化学钢化。

6.4.3 表面处理

表面处理是为了达到以下目的：

1）形成光滑面或散光面，通过表面处理以控制玻璃表面的凹凸，如玻璃的化学蚀刻和化学抛光。

2）改变玻璃表面的薄层组成，以及改善表面的性质或赋予新的功能，如表面

着色及用 SO_2、SO_3 处理玻璃表面，增加玻璃的化学稳定性。

3）在玻璃表面涂以膜层以获得新的性能。如镜子的镀银、各种反射玻璃、吸热玻璃、光学玻璃表面涂膜等。

以下对几种表面处理技术进行介绍。

1. 玻璃的化学蚀刻处理

一般是利用氢氟酸对硅酸盐玻璃的腐蚀作用，溶掉玻璃表面层的硅氧。根据残留盐类的溶解度不同，而得到有光泽的表面或无光泽的毛面。

玻璃与氢氟酸反应生成盐类的溶解度各不相同。其中碱金属（K 和 Na）的氢氟酸盐易溶于水，而 CaF_2、BaF_2、PbF_2 则不溶于水。在氟硅酸盐中 K、Na、Ba、Pb 的盐溶解很少，而其他金属的盐类则易溶解。

蚀刻后玻璃的表面性质决定于氢氟酸与玻璃作用后所生成的盐类性质，如生成的盐类溶解度小，且以结晶状态保留在玻璃表面不易清除，遮盖玻璃表面，阻碍氢氟酸与玻璃接触，则玻璃表面受到不均匀侵蚀，得到粗糙而无光泽的表面，如生成的盐类溶解度大，不断被清除。腐蚀作用很均匀，则可获得非常平滑或有光泽的表面。玻璃表面蚀刻过程中的结晶大小对光泽度也有影响。结晶大则产生光线的漫射，表面无光泽，玻璃的化学组成是影响化学蚀刻的主要因素之一。例如，对于含碱或碱土金属氧化物很少的玻璃则不适宜毛面蚀刻；含 PbO 较多的玻璃，则会形成细粒毛面；含 BaO 多时，则呈粗粒毛面；含 ZnO、CaO 或 Al_2O_3 多时，则呈中等粒状毛面。另外蚀刻液的组成也是影响蚀刻表面的主要因素，蚀刻液中如含有溶解反应生成盐类的成分，如盐酸或硝酸等，即可获得有光泽的表面。因此，生产中常采用氢氟酸与硝酸或盐酸组成的混合液作为蚀刻液。

2. 玻璃的化学抛光

它是利用氢氟酸破坏玻璃原有表面的硅氧膜，生成一层新的硅氧膜。使之平滑光亮，增强美感。化学抛光有两种方法：一种是单纯的化学侵蚀作用；另一种是用化学侵蚀和机械研磨相结合。前者用于玻璃器皿，后者用于平板玻璃。处理的时间和酸液的温度可根据玻璃来制定。

3. 玻璃的表面金属涂层

玻璃表面上镀上一层金属薄膜。广泛用于制造热反射玻璃、护目玻璃、膜层导电玻璃、保温瓶、玻璃器皿以及各种装饰品等。玻璃表面镀金属薄膜的方法有化学法和真空沉积法。前者可分为还原法、水解法（又称液相沉积法）等；后者又分为真空蒸发镀膜法、阴极溅射法、真空电子枪蒸法等。化学法常应用在玻璃表面难以镀金、银、铜等表面加工中。真空沉积法已广泛用于制造汽车用的车内外反射镜（多数用铬）和汽车外侧反射镜（用铝等）。溅射法镀金制造导电玻璃、热反射玻璃及集成电路基板上电极等都已在生产中使用。

4. 表面着色

又称扩散着色，是在高温下用着色离子的金属、熔盐、盐类的糊膏涂覆在玻璃

表面上，使着色离子与玻璃中离子进行交换，并扩散到玻璃表层中使表面着色。有些利用金属离子还原为原子，原子集聚成胶体而着色。玻璃表面着色后是透明的，表面平滑光洁具有装饰效果等。还可以将釉彩印在或将花纸贴在玻璃制品表面，在烤花窑中以适当温度烘烤，使釉彩牢固附着在制品上，使之美观或注标记。

6.5 玻璃的缺陷

玻璃内由于存在各种夹杂物而引起其宏观均匀性的破坏，称为玻璃的缺陷。由于成因不同，玻璃缺陷多种多样，按其状态不同可分为三类。

6.5.1 结石

又称固体夹杂物。它不仅破坏了玻璃制品的外观和光学均一性，还降低了制品的使用价值。根据结石的成因，可将其分为配合料结石（未熔化的颗粒）、耐火材料结石、玻璃液的析晶结石、硫酸盐夹杂物（碱性类夹杂物）以及多种原因形成的“黑斑子”夹杂物等。由于结石与周围玻璃的热胀系数不一样，会产生较大的局部应力，大大降低制品机械强度和热稳定性，甚至导致玻璃的自行碎裂，特别是结石的热胀系数小于周围玻璃的热胀系数时，在它们的界面上形成拉应力，常会出现放射状的裂纹。玻璃中通常不允许有结石存在。因为结石是玻璃内最危险的缺陷。

6.5.2 气泡

又称气泡夹杂物。它不仅降低了玻璃的透光度和机械强度，还影响玻璃的外观质量。根据气泡的成因。可将其分为一次气泡（配合料残留气泡）、二次气泡、外界空气气泡、耐火材料气泡以及金属铁引起的气泡等。一次气泡是玻璃配合料在熔化过程中，由于各组分一系列化学反应和易挥发组分的挥发、产生大量气体而形成的；二次气泡是澄清后的玻璃液同溶解其中的气体处于平衡状态被破坏后，重新形成的气泡和灰泡。来自玻璃成型操作过程的气泡属于外界空气气泡；玻璃与耐火材料的物理化学作用所产生的气泡叫耐火材料气泡；在玻璃池窑操作中由于使用铁件或配合料中含有铁质，铁质溶解而形成的气泡称为金属铁引起的气泡。气泡的化学组成是不同的，常含有 O_2、N_2、CO、SO_2、NO、H_2O（气）等。气泡形态有球形、椭圆形及线形等。气泡大小由几个微米到几个毫米，按尺寸大小气泡可分灰泡（直径 $<8\mu m$）和气泡（直径 $>8\mu m$）。

气泡是一种极易引起注意的玻璃缺陷。

6.5.3 条纹和节瘤

又称玻璃态夹杂物，是玻璃内存在的异类夹杂物，在化学组成和物理性质上

（如折射率、密度、粘度、表面张力、热膨胀、强度及颜色等）与玻璃主体不同。条纹和节瘤可分布在玻璃的内部或表面，多数呈条纹状，有时呈疙瘩状而凸起，条纹和节瘤由于成因不同，可以是无色的，也可以是绿色或棕色的。条纹和节瘤是玻璃不均匀性的缺陷，对光学玻璃是不允许存在不均匀性，但一般玻璃可允许存在一定程度的不均匀性。

6.6 玻璃的性能

由于玻璃具有一些独特的性能，所以是一种非常重要的材料。其主要性能有化学稳定性、强度、硬度、不渗透性、光学性质、热性能等。

玻璃是处于玻璃态的一种物质，其实质是一种凝固时基本不结晶的无机熔融物。因而其物理性质和力学性质是各向同性的。

6.6.1 力学性能

（1）密度　它是表征玻璃结构的一个参数。在玻璃制品的质量或池窑的热工计算时有一定的实际意义。

目前应用玻璃密度测定作为控制玻璃工艺生产的手段。玻璃密度在 2.3 ~ 8g/cm^3 之间，常用工业玻璃为 2.5g/cm^3，石英玻璃最小为 2.3g/cm^3，铅玻璃（含 PbO 达 80%）最大为 8g/cm^3。玻璃密度与其化学组成有关，故变化较大，且随温度升高而减小。

（2）硬度　它是玻璃重要的工艺性质之一。玻璃的研磨、切割、抛光、刻花、钻孔等工艺条件都取决于这一性质。玻璃的硬度取决于其组成成分。玻璃的硬度比较高，玻璃的莫氏硬度介于 5 ~ 7 之间。通常石英玻璃、硼硅玻璃的硬度最大，含较多碱金属氧化物的玻璃硬度较小，铅玻璃是最软的。

测定玻璃硬度的方法有划痕法、磨损法和莫氏法，一般用莫氏硬度计测定。莫氏硬度以 10 种具有不同硬度的矿物为标准，构成莫氏硬度计。硬度表见表 6-5。

表 6-5　硬度表

矿物名	莫氏硬度	矿物名	莫氏硬度
滑石	1	长石	6
石膏	2	石英	7
方解石	3	黄晶	8
萤石	4	刚玉	9
磷灰石	5	金刚石	10

6.6.2 机械强度

玻璃的强度由玻璃的化学组成、均匀性、表面状态、试件尺寸、退火温度、环

境温度等因素决定，还与其制品形状、表面性质和加工方法有关。凡含有未熔夹杂物、结石、节瘤或微裂纹，都会造成应力集中而急剧降低玻璃强度。玻璃的理论强度很高（约为10000MPa），而实际强度为理论强度的1%以下。如玻璃的理论抗拉强度为5350MPa，实际强度仅为40～60MPa，也就是说，玻璃的强度与化学组成关系不大，这是因为玻璃制品内存在微观上的不均匀性，有未熔夹杂物、结石、节瘤或表面具有微细裂纹、细微伤痕、刮伤等缺陷存在，产生了超过玻璃结合力的应力集中，使玻璃在低应力作用下就破坏。人们用金刚石刮痕折断玻璃板也是这个原理的实际应用。据测定，在1mm^{2}玻璃表面上含有300个左右的微裂纹，其深度为4～8nm。

玻璃的抗压强度较高，为700～1000MPa，因此，玻璃破坏几乎都是拉应力引起的。抗拉强度是决定玻璃品质的主要指标，通常为抗压强度的1/14～1/15，约40～120MPa。对于玻璃这种典型的脆性材料而言，当应力超过弹性极限时，玻璃在没有塑性变形的瞬间，裂纹就遍及整体而脆性断裂。脆性是玻璃的主要缺点，玻璃的脆性指数（E/f_t）为1300～1500（钢为400～450，混凝土4200～9350，橡胶为0.4～0.6）。脆性指数越大，材料的脆性越大。玻璃的脆性也可根据冲击强度来确定。玻璃在-50～70℃环境温度下使用，其强度是不变的。但在高温下，当玻璃粘度降低10^{10}～10^3Pa·s时则强度急剧下降，玻璃长期承受载荷作用后表面会产生极细的裂纹，导致强度降低，为恢复其强度，可用氢氟酸处理玻璃表面。玻璃抗弯强度小于45MPa，并随加载时间的延长和玻璃宽度增大而降低。普通玻璃的弹性模量为70000～80000MPa，与铝相近。随着温度升高弹性模量下降，出现塑性变形。用于容易变形结构的玻璃制品，须选用弹性模量小的玻璃。玻璃通过强化、表面处理、微晶化等工艺措施可增加其强度。

对于玻璃表面的缺陷，通常可经退火或表面增强处理而使强度增大，退火玻璃一般强度可达70MPa以上，而通过钢化处理可使强度达140～280MPa，这种玻璃通常称为钢化玻璃。通过钢化处理可使外表面具有较高压力，而内部具有拉应力来提高强度。

6.6.3 热学性能

（1）比热容 玻璃的比热容随温度的变化而变化，在15～100℃的温度范围内，其比热容为0.63～1.05J/(kg·K)。在低于玻璃转变温度和高于软化温度的温度范围内，玻璃比热容几乎变化不大，但在转变温度以上和软化温度以下时，玻璃比热容随温度上升迅速增加，此时玻璃中进行解聚过程，需吸收热量。玻璃性质与温度的关系如图6-1所示。玻璃比热容与化学组成有关。

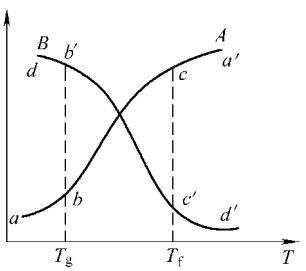


图6-1 玻璃性质与温度的关系
A—比热容、导热系数及热胀系数 *B*—粘度

（2）导热系数　是玻璃热性能中的一个基本参数，是影响玻璃稳定性的重要因素。玻璃的导热系数与比热容成正比。通常玻璃的导热性能较差，在100℃以下时其导热系数为0.4～0.82W/(m·K)，仅为钢的1/400，所以一般玻璃不耐温度急剧变化。但玻璃的导热性随温度升高而增大，当温度加热到转变温度时，玻璃的热导率可增加一倍，见图6-1。其次还与玻璃颜色和化学组成有关。对于密度相同的不同玻璃，它们的导热性相差不多。

（3）热胀系数　玻璃热胀系数决定于化学组成和纯度，在 T_g 以下，膨胀系数几乎与温度无关，主要决定于玻璃中化学键的强度，键强高则膨胀系数小。对于氧化物玻璃而言，键强主要决定于阳离子的电场强度，网络形成离子 Si^{4+} 具有很高的场强，因此石英玻璃的膨胀系数很小。在普通玻璃中因引入 R_2O 和 RO，网络开裂。形成 Si－O－R－Si 三键，其中 R－O 键远弱于 Si－O，因此，普通玻璃膨胀系数较石英玻璃为大。如在普通玻璃组分中引入 Al_2O_3，适量时起补网作用会使膨胀系数下降，或引入 B_2O_3，适量时由于形成 $[BO_2]_n^{n-}$ 网络结构，而使膨胀系数下降。在 T_g 以上，膨胀系数增大，直到 T_f 点为止。一般条件下，玻璃的热胀系数较小，通常在$5.8\times10^{-7}\sim150\times10^{-7}$/℃之间。玻璃的纯度越高，其膨胀系数越小。

（4）热稳定性　玻璃热稳定性是一系列性质（热胀系数、弹性模量、导热系数、密度、抗拉强度等）的综合表现。它决定了玻璃在温度急剧变化时抵抗破裂的能力。玻璃热胀系数是决定其热稳定性的重要因素，膨胀系数越小，热稳定性越好。其次与热导率的平方成正比。由于玻璃的导热性较差，而弹性模量值很高、抗拉强度较低，当温度急变时内部产生温度变形，很容易由于热应力值而导致玻璃破裂。凡玻璃制品越厚、体积越大，热稳定性也越差。由于制品的热胀冷缩，其内部会产生压、拉应力，所以玻璃制品抵抗温度急剧上升的热稳定性比急剧下降时为大。玻璃常含有游离的 SiO_2，具有残余膨胀的性质，会影响制品的热稳定性。因此须用热处理的方法加以消除，以提高制品的热稳定性。

6.6.4　光学和着色性能

玻璃作为透光和采光材料，其基本光学性质是对光的折射、反射、透过和散射等。其中透光性和折光性是玻璃具有广泛应用价值的重要特征之一。光通过玻璃（或介质）时会发生折射、透过、反射及吸收等现象，见图6-2。

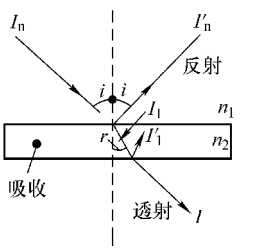


图6-2　光通过玻璃时的现象

1. 折射率

光线通过玻璃时，光的行进方向发生变化称为折射。玻璃的折射率（n）为光线从空气到界面的入射角 i 与出界面后的折射角 i' 的两个正弦之比，即 $n=\sin i/\sin i'$，其值等于光在空气中的速度与在介质中速

度之比值（$n = c_0/c$）。由于玻璃密度比空气大（空气密度为 $1mg/cm^3$），因此玻璃折射率大于1。玻璃折射率受化学组成、退火程度等影响而变化。折射率必须用指定波长的光线来定义。一般采用钠光谱 589.3nm 的 D 线作为标准波长，钠钙玻璃的折射率为 1.50～1.52，铅玻璃为 2.0。玻璃具有较大的折光性，利用这一性质，可将玻璃制成光彩夺目的艺术品和优质的日用器皿等。

光线通过玻璃时，由于各种组分的折射率不同，产生了漫射（称为色散现象），会使玻璃变暗。这种现象对光学玻璃的质量有严重影响。

2. 透光率

透光性是玻璃制品的重要特性。当光线投射到玻璃的界面时，总会有一部分光被反射而折回原介质中，进入内部的那部分，又有一部分被玻璃所吸收，另一部分透过玻璃而射出。玻璃对光的透过能力随化学组分而异，通常增加 B_2O_3 和 SiO_2 组分含量，可以提高玻璃的透光性。而氧化铁（Fe_2O_3、FeO）会降低玻璃的透光性。其次玻璃的厚度和外观缺陷也影响其透光性，如玻璃厚度增加，其内部的吸收增加，透光性也就降低。玻璃的透光性可用透光率定量表示，通常用透射出物体后的光通量 Φ_2 对射到物体上的光通量 Φ_1 的百分比称为透光率（τ），即 $\tau = (\Phi_2/\Phi_1) \times 100\%$ 表示。

无色玻璃可以透过各种波长的光线，可吸收红外线和紫外线。各种有色玻璃能透过同波长的光线而吸收其他波长的光。玻璃对光线的吸收能力随化学组成和颜色而异。无色玻璃可透过各种颜色的光线。各种颜色的玻璃能透过同色光线而吸收其他颜色的光线。石英玻璃和硼、磷玻璃能透过紫外线，锑、钾玻璃能透过红外线，铅、铋等原子序数大的氧化物玻璃能吸收 X－射线和 γ－射线。因此玻璃既能透过光线，还有反射光线和吸收光线的能力，所以厚玻璃和重叠多层的玻璃，往往不易透光。

3. 玻璃的着色

当透明玻璃作为容器时，消费者对内容物可一目了然，并能少用或不用表面装饰而表现内容物的自然状态，同时，玻璃表现为各向同性、光亮，使玻璃容器具有极好的陈列效果，给人以明亮、清晰、高档的感觉。

然而，玻璃的高透明度对某些内容物包装却是不利的，为了防止有害光线对内容物的损害，玻璃可以通过着不同的颜色来防止。在这方面玻璃具有很大的灵活性，如洗发膏通常用乳白色瓶，而啤酒大多用茶色或绿色瓶包装。

绿色、琥珀色、乳白色称为标准三色，玻璃的颜色可通过加入各种着色剂加以着色，着色剂的加入，除了影响光学性能外，对玻璃的其他性能基本上无影响。根据着色剂在玻璃中所显现的状态不同，可分为离子着色剂、胶体着色剂两大类，见表6-6。

表 6-6　各种着色剂的着色情况

着色剂	在氧化条件下产生的颜色	在还原条件下产生的颜色	着色剂	在氧化条件下产生的颜色	在还原条件下产生的颜色
硫化镉	无	黄色	氧化铁	黄绿色	蓝绿色
硫化镉与硒	无	黄色橙色至红色（加热显色）	氧化锰	紫色	无
氧化钴	蓝色带紫色	蓝色带紫色	氧化铵	紫色	紫色
氧化铜	蓝绿色	蓝绿色	氧化镍	紫红色（钾玻璃）、棕色（钠玻璃）	同左
氧化亚铜	绿蓝色	红色（加热显色）黄色	硒	挥发	同左
金	红色（加热显色）	—	硫	无	紫色
氧化铬	黄绿色	翠绿色	铀	黄色带有绿色荧光	黄至琥珀色带有荧光的绿色

玻璃中如含有能够选择性吸收某些波长的着色剂，玻璃就会出现与被吸收波长光的互补颜色，其关系见表 6-7。

表 6-7　吸收光谱颜色及互补色

波长范围/nm	光谱颜色	互补颜色
760 ~ 647	红	蓝绿
647 ~ 585	橙	青
585 ~ 565	黄	蓝
565 ~ 492	绿	绿红
492 ~ 455	青	橙
455 ~ 424	蓝	黄
424 ~ 400	紫	黄绿

由于光线也是一种电磁波，当玻璃中分子振子（包括离子或相当于分子大小的原子团）的本征频率与入射光红外波段的频率相同或相近时，就会因分子共振而产生红外吸收。同理，当玻璃中的价电子或束缚电子的本征频率与紫外波段频率重合时，将产生电子共振而引起紫外吸收。

普通钠－钙－硅玻璃中加入金属氧化物而出现了非桥氧，非桥氧的化学键力弱，激发其上的价电子所需能量较小，一般紫外光足以提供这一能量，故能吸收一定频率范围的紫外光。此外，玻璃中添加不同的着色剂也能吸收紫外光而有效地阻挡紫外光透过。玻璃对紫外光的吸收和阻挡性能对食品包装有重大意义。

6.6.5　化学稳定性

玻璃抵抗气体、水、酸、碱或各种化学试剂的能力称为化学稳定性。玻璃的化学稳定性较高，但长期处在侵蚀性介质的环境下，也能导致变质和破坏。因此，各种玻璃制品都应有所规定的化学稳定性指标，如耐水性、耐酸性和耐碱性等。

1. 耐水性

玻璃抵抗水或水蒸气侵蚀的能力称为耐水性，是玻璃化学稳定性中最重要的一个性能。高温受热，水也可以侵蚀玻璃，加压可使玻璃腐蚀加剧。例如硅酸盐类玻璃在水或水蒸气的介质中使用，经常受到雨水和大气中水汽的侵蚀，能水解生成碱和硅酸，使玻璃表面发霉、产生斑点、降低透光性。

玻璃与水的作用可分为两个过程，首先是水分子扩散和玻璃中的 Na^+ 与水溶液中的 H^+ 进行交换，然后是溶出的 Na^+ 在水溶液中形成 NaOH，进而对玻璃的更深层进行碱侵蚀，因而水侵蚀结果就变成碱侵蚀。例如硅酸盐玻璃长期受水汽的作用，能水解生成碱和硅酸，这种现象称为玻璃的风化。

含二价金属氧化物的硅酸盐玻璃水解较慢，且生成难溶的氢氧化物，故化学稳定性较好。其中含 Ca^{2+}、Mg^{2+} 的玻璃比含 Ba^{2+}、Pb^{2+} 玻璃的化学稳定性更好。铝酸盐和硼酸盐类玻璃化学稳定性最好，磷酸盐玻璃在退火处理中，由于碱性氧化物与炉气中的 SO_2、SO_3 及水汽相作用，生成易于清除的灰色斑点和薄膜，降低玻璃表面的含碱量，从而提高玻璃的化学稳定性。玻璃中的碱性氧化物在潮湿空气中能与二氧化碳反应生成碳酸盐，当水分蒸发后，碳酸盐聚集在玻璃表面形成白色斑点或薄膜，破坏了玻璃的透光性，称为玻璃发霉。可用酸处理玻璃表面并加热到 400 ~ 450℃，不仅可溶去斑点和薄膜，还能得到致密的表面薄膜，进而提高玻璃的化学稳定性。

2. 耐酸性

玻璃抵抗酸性介质侵蚀的能力称为耐酸性。除氢氟酸外，其他酸都不能使多数工业玻璃发生腐蚀。硅酸盐玻璃的耐酸性主要决定于二氧化硅、碱金属或碱土金属的相对含量，含氧化钛、氧化钽和氧化铌等氧化物的玻璃耐酸性较好。玻璃与酸反应的实质是玻璃中的 K^+、Na^+、Ca^+ 与溶液中的 H^+ 进行交换，由于 H^+ 半径较小，结果在玻璃表面的网络结构中留下空穴，剩下了硅酸骨架。（HF + HCl）酸的混合液与玻璃作用时，能使生成的氟硅酸钠溶解，破坏了玻璃组成和结构。玻璃加工中利用这一反应对玻璃进行蚀刻。

3. 耐碱性

玻璃抵抗碱性介质侵蚀的能力称为耐碱性。一般玻璃耐碱性较差，因为组成玻璃的二氧化硅网络结构很容易被碱所溶解而转入溶液。玻璃受碱侵蚀后其质量减轻，从失重大小可以分析玻璃的耐碱性能。含有氧化锆、氧化锌、氧化铝等成分的玻璃，具有较好的耐碱性。

4. 耐发霉性

玻璃在使用、贮存等过程中，由于微生物在玻璃表面滋生而引起的表面侵蚀，是一种较复杂的生物－化学过程，这与环境的温湿度有关。光学玻璃、高铅玻璃等的发霉都属于生物发霉。为防止生物发霉，可在玻璃组成中引入少量具有杀菌能力的金属离子或在金属表面涂膜前进行杀菌处理。

就玻璃本身来说，玻璃的酸碱性也会影响其耐化学性能。中性玻璃（含硼、铝量多者）较碱性玻璃（如钠钙玻璃）具有更高的耐蚀性能。钠钙玻璃中的碱性物质（如 Na_2O）会慢慢地从玻璃中析出而影响内容物品质，析出的碱金属在玻璃表面呈“白点”或从表面脱落，发生所谓的“风化”现象，从而形成悬浮或沉淀。化学品、医药品基本上采用中性玻璃容器进行包装。

6.6.6 电学性能

玻璃作为电绝缘材料时，其电学性质起主要作用。硅酸盐玻璃在常温下的电阻率一般 $>10^7\Omega\cdot m$，可作绝缘材料使用。但当温度升高时，电阻率迅速下降，在 T_g 附近电阻率急剧降低。此后，随温度的继续上升，电阻率变化趋于平坦。因此，当温度接近 T_g 转变温度时，玻璃则成为优良的导体，属于离子导电类型。玻璃作为电绝缘材料及介电质时，它的介电性质十分重要，玻璃的介电性能随化学组成、电压、温度和湿度而变化。

6.6.7 阻隔性能

对于所有的气体、溶液或溶剂，玻璃是完全不渗透的。经常把玻璃作为气体的理想包装材料。玻璃作为包装容器，其气密性能是无可伦比的。

6.7 玻璃的主要品种和应用

硅酸盐玻璃按用途和外形可分建筑玻璃、安全玻璃、信号玻璃、特种玻璃及瓶罐玻璃等。

6.7.1 建筑玻璃

用于建筑物的门、窗、屋面、墙体及室内外装饰、采光、遮像、隔声、隔热、防护玻璃制品的总称，包括各种平板玻璃及其制品。建筑玻璃不仅具有采光和防护功能，而且是良好的隔声、隔热和艺术装饰材料。随着建筑玻璃品种的发展，已越来越多地代替砖瓦、木材、钢材及混凝土等建筑材料。

1. 平板玻璃

板状无机玻璃制品的统称，是加工成各种工业技术玻璃的基础材料。平板玻璃可根据需要通过着色、表面处理、增强、施釉和复合等方法，制成不同色彩或具有特

殊性能的制品。广泛用于建筑物、船舶、飞机等交通运输工具、制镜和制板等方面。

（1）普通窗玻璃 又称净片玻璃，属钠钙玻璃类，是未经研磨加工的平板玻璃。主要起透光、挡风和保温的作用。要求具有较好的透光度，表面平整和无缺陷，窗用玻璃的分类见表6-8，窗用玻璃的性能见表6-9。

表6-8 窗用玻璃的分类

按面积分类		按厚度分类			按外观质量分类	附注
类别	面积范围/m^2	厚度/mm	尺寸范围/mm			
1	0.120～0.400	2	宽	300～900	特优品 一级品 二级品	1. 在长度尺寸范围内，每隔50mm为一进位，但长度不得超过宽度的2.5倍 2. 凡不用于经常生产的尺寸或宽度和质量超出上述范围的玻璃均为特殊订货，由供需双方协商解决 3. 质量标准见相关标准
2	0.405～0.600		长	400～1200		
3	0.605～0.800					
4	0.805～1.000	3	宽	300～900		
5	1.005～1.200		长	400～1600		
6	1.205～1.500					
7	1.505～2.000	5	宽	400～1600		
8	2.005～2.500		长	600～2000		
9	2.505～3.200					
10	3.205～4.000	6	宽	400～1800		
11	4.505以上		长	600～2200		

表6-9 窗用玻璃的性能（参考数据）

力学性能		光学性能		热性能
密度/（g/cm^3）	2.5	透光率	厚2mm≥88%	比热容837.2J/（kg·K）（0～50℃） 软化温度720～730℃ 线胀系数（8～10）$\times10^{-6}$/K 导热系数0.78～0.82W/（m·K）
硬度（莫氏）	5～6.5			
抗压强度/MPa	880～930		厚3mm≥86%	
抗拉强度/MPa	40～60			
弹性模量/MPa	（5～10）$\times10^5$		厚5.6mm≥82%	

（2）磨光玻璃 又称镜面玻璃，是经研磨和抛光而具有平整光滑表面的平板玻璃。分单面磨光和双面磨光两种，厚度为5～6mm。从任何方向透视或反射物像均不呈光学畸变现象，透光率大于84%。多用于制镜、照相底板以及高级建筑物的门窗等。由于浮法的发展，大部分产品已为浮法玻璃所取代。

（3）磨砂玻璃 又称毛玻璃。通常采用机械喷砂、手工研磨或氢氟酸溶蚀等方法，将普通平板玻璃表面处理成均匀毛面。由于表面呈微细凹凸层而不透明，使光线漫射且均匀柔和。多用于建筑物要求透光而不透像的门、窗以及照相屏板、玻璃黑板等。

（4）花纹玻璃 根据加工方法的不同，分为压花玻璃和喷花玻璃两种。压花

玻璃又称滚花玻璃，采用压延法，在双辊压延机的辊面上雕刻所需要的花纹，当玻璃带经过压辊时，即被压延成压花玻璃。压花玻璃种类繁多，按照压花面可将其划分成单面压花玻璃和双面压花玻璃。按照颜色可将其划分为白色、黄色、蓝色、红色、橄榄色。按照花纹图案可将其划分为植物图案，如梅花、菊花、竹叶等；装饰图案，如夜空、银河、条纹、布纹等。压延法生产的压花玻璃表面凹凸不平，当光线通过时产生漫射而失去透明性，即压花玻璃透光不透明。由于花纹的作用，降低了透光度，一般压花玻璃的透光度在 60% ~70% 之间。压花玻璃的装饰特性是图案、花纹繁多，颜色丰富，透光而不透明，室内光线柔和而朦胧，所以具有强烈的装饰效果，广泛应用于宾馆、办公楼、会议室、浴室、厕所等现代建筑的装修工程中，使之富丽堂皇。喷花玻璃又称胶花玻璃，是在平板玻璃表面上贴以花纹图案，抹以护面层，经喷砂处理而成。适用门窗装饰、采光之用。

（5）彩色玻璃　又称有色玻璃，分透明和不透明两种。透明彩色玻璃是在原料中加入一定的金属氧化物使玻璃着色；不透明彩色玻璃是在一定形状的平板玻璃的一面喷以色釉，经烘烤退火而成。其颜色有红、黄、蓝、绿、灰、黑、乳白色等十余种。彩色玻璃可拼成各种图案花纹，具有耐腐蚀、抗冲击、易清洗等特点。适用于门窗及对光线有特殊要求的采光部位和装饰内外墙面之用。

（6）导电和电加热玻璃　这是一种能整体导电或表面导电的玻璃。用它制成电加热元件，除用于建筑外，还可用于飞机、舰艇、汽车或寒冷地区观察哨所的除冰、防霜。

2. 泡沫玻璃

又称多孔玻璃。根据基础原料，可分为普通泡沫玻璃、石英泡沫玻璃和熔岩泡沫玻璃等。通常将玻璃粉或其他粉状基础原料与发泡剂按一定比例混合，置于模具中，送入发泡窑，加热至发泡温度，由于发泡剂产生大量气体，使软化的玻璃发泡，然后脱模退火。它具有封闭的连通气孔，孔径为 0.1 ~0.5mm，气孔率达 80% ~90%，表观密度为 120 ~500kg/m^3，抗压强度为 0.7 ~8MPa，导热系数为 0.034 ~0.1044W/(K · m)。泡沫玻璃具有良好的隔热、隔声、不燃、耐腐、可割锯、粘接等优点，作为墙面、屋面和地板的保温、隔声材料。

3. 空心玻璃砖

带有密封腔的块状玻璃制品。将两块模压成圆形的玻璃元件体熔接或胶接成为一整体，空腔内充以干燥气体或填入玻璃纤维等热绝缘材料，有单腔和双腔两种。玻璃砖内外均为光面或内外表面压成各种凹凸花纹，还可用着色玻璃。形状有方形、长方形、六方形及棱柱体等多种，也可制成单元墙体便于砌筑装配。多用于建筑物的透光墙体和楼板等。

6.7.2　安全玻璃

平板玻璃经过强化处理或与其他材料复合，使之具有较高的抗冲击性能，破碎

时形成无尖角的小碎片，且不会飞散伤人的一类制品的总称。安全玻璃主要有如下几种。

1. 钢化玻璃

又称强化玻璃。分为平钢化和弯钢化两种。强化方式有物理强化和化学强化等。物理强化玻璃通常采用风淬火、油淬火及熔盐淬火等方法，即加热骤冷钢化法。当玻璃在加热炉内加热至接近软化点时，迅速从炉内移出，经高速吹风骤冷而制成。玻璃经淬火处理，内部产生均匀的拉应力，而玻璃表面产生预压应力，从而增加了抗弯强度、冲击强度和抗热震性能；化学强化玻璃通常采用离子交换法和表面晶化等较新方法。例如离子交换法是将待处理的玻璃浸入钾盐溶液中，使玻璃表面的钠离子扩散到溶液中，而溶液中的钾离子则紧密填充玻璃表面钠离子的位置，进而增加了玻璃的强度。化学强化玻璃具有更高的抗弯强度、抗冲击强度和抗热震性能。钢化玻璃有普通钢化玻璃，其抗弯强度是同厚度普通玻璃的3倍；磨光钢化玻璃由磨光玻璃经钢化处理而成，兼有磨光玻璃和钢化玻璃的特点；钢化吸热玻璃由吸热玻璃经钢化处理而成，兼有吸热玻璃和钢化玻璃的特点，适用于车厢和受震车间及高温车间的采光和防护。

2. 夹层玻璃

将2~8层玻璃间夹嵌透明塑料，经热压粘合而成的或平板或弯曲的复合玻璃制品。具有很高的冲击强度，破坏时仅呈同心圆形裂纹，不落碎片，不影响透光度和产生折光现象。夹层玻璃可用普通平板、磨光、钢化和热反射等玻璃作为原片，采用赛璐珞和聚乙烯醇缩丁醛树脂为夹层。前者塑料衬片在潮湿和阳光的长期作用下，易逐渐泛黄而降低透光度，可作一般使用的夹层玻璃。后者树脂衬片具有雨水和防老化作用。可作为军用飞机风窗、坦克窥视窗以及高级轿车的防弹、防震玻璃等。

3. 夹丝玻璃

又称防碎玻璃。当玻璃通过压延辊之间成型时，将预热处理的金属丝（网）压入玻璃中间而制成。具有较高的冲击强度，受冲击或温度剧变时，破而不缺、裂而不散，避免棱角的小块飞出伤人。当火灾蔓延时夹丝玻璃受热炸裂仍能保持固定，起到隔绝火势的作用，故又称防火玻璃。制品有压光夹丝、磨光夹丝和彩色夹丝等，适用于建筑中需要采光又要求安全性的门窗玻璃等。

4. 防静电和抗电磁波干扰玻璃

这是一种具有导电性能和能够屏蔽、吸收电磁波的功能玻璃。如果在微波或无线电通信、电子计算机工作室、战场指挥部或各种需避免电磁波干扰的仪表周围装备这种玻璃，可有效防止静电和外部信号的干扰，也可有效防止内部信号的泄露。

6.7.3 信号玻璃

在铁路、航空、航海和城市交通设施中作为人们通信与联络手段的玻璃制品，分有色和无色两类。无色信号玻璃利用了玻璃的透光特性制成各类聚光和散光透

镜；有色信号玻璃则利用了玻璃对光源的选择性吸收特性制成。其质量指标常用色饱和度、主波长和透光率来衡量。信号玻璃要求色彩鲜明、均匀一致、不含气泡、透光度高、表面光洁，有选择的色光透过性、耐候性及较好的热稳定性。通常在 -40 ~ 80℃环境下使用，不得有龟裂现象。信号玻璃有如下几种。

（1）平板色玻璃　颜色有红、绿、橙黄、无色四种。

（2）凸透镜玻璃　颜色有红、绿、橙、黄、蓝、紫、月白和无色等多种。凸透镜玻璃按梯纹不同，分为内梯纹和外梯纹两种。

（3）偏光镜玻璃　具有各种颜色，偏光度分为 10°、20°和 30°等。

（4）信号灯用玻璃　颜色有红色、绿色、黄色、乳白色和无色等。要求颜色均匀一致、外观无缺损、裂纹和伤痕等缺陷。分凸光圆形和平光弯形两种。

6.7.4　特种玻璃

1. 吸热玻璃

能吸收大量红外线辐射能而又能保持良好可见光透光率的平板玻璃。吸热玻璃制造一般有两种方法，一种是在普通的硅酸盐玻璃中引入一定量的吸热性能的着色剂，如氧化亚铁、氧化镍、氧化钴和氧化铁等；另一种方法是在玻璃表面喷涂吸热和着色的氧化物薄膜，如氧化锡和氧化锑等。主要品种有茶色吸热玻璃、灰色吸热玻璃及蓝色磨光吸热玻璃等。用改变玻璃化学组分的方法，还可以制成中性灰色或青铜色吸热玻璃。吸热玻璃能吸收太阳辐射热，防止炫目光线射入，其吸收太阳辐射热为 20% ~60%，透光率为 75%，能明显减少紫外线透射对人体的损害。吸热玻璃可用于现代建筑的高级装饰玻璃、特殊仓库、航空控制塔以及彩色印刷等方面。

2. 热反射玻璃

具有较高的热反射能力而又保持良好透光性的平板玻璃。热反射玻璃制造方法是在玻璃表面涂敷金、银、铝、铜、镍和铬等金属或金属氧化物薄膜。其薄膜的制备有热分解法（喷涂法、浸涂法）、化学浸渍法、金属离子迁移法、真空法（真空镀膜法、溅射法）等涂层方法。热分解法热反射玻璃，其透光率为 45% ~66%，反射率为 30% ~40%，遮光系数为 0.6 ~0.8，具有良好的耐磨、耐蚀和化学稳定性。化学浸渍法和真空镀膜法热反射玻璃，在玻璃表面涂以铜、镍、铬和钛等金属或多层膜。其透光率为 20% ~30%，反射率为 20% ~40%，遮光系数为 0.3 ~0.4，辐射率为 0.4 ~0.7，具有良好的隔热性能和遮光性。热反射玻璃比吸热玻璃具有良好的隔热性能。可使日晒时室内温度保持稳定，光线柔和，降低空调费，增加建筑艺术效果。热反射玻璃多制成双层中空玻璃或夹层玻璃窗。大面积使用即为玻璃幕墙，幕墙内可以看到室外景色，而室外却不能看清室内景物，感觉舒适。

3. 光致变色玻璃

又称变色玻璃。光致变色玻璃在太阳或其他光线照射时，玻璃的颜色会随光线增强而逐渐变深，或由深色变为浅色，此过程可以反复进行。当光照停止时，又恢

复到原来的颜色。一般由浅而深变化较快，反之则较慢。变色玻璃在最深色时，仍有45%的透光率。

这种玻璃是在碱铝硼酸盐玻璃原料中加入氯化银和卤族元素中的一种或多种，经熔化和加热处理而成。含氯化银的玻璃的敏感波长范围为300～400nm，溴化银敏感范围为300～550nm，氯化银、碘化银敏感范围为300～650nm。由于生产这种玻璃要消耗大量的银，一般用于特殊的车辆和建筑物上。

4. 中空玻璃

它是用两层或两层以上平板玻璃构成，四周用高强高气密性复合粘结剂将两片或多片玻璃与铝合金框或橡皮条、玻璃条粘结、密封，中间充以干燥气体，还可以涂以不同颜色或不同性能的薄膜，原片玻璃可用普通平板、磨光、钢化、压花、吸热和夹层等玻璃。制成方法有焊结、胶结和熔结。中空玻璃透光率为75%以上，使用温度为－40～60℃，结霜在－25℃以下，隔音量不小于25dB。因此具有良好的采光、绝热、隔音、防结霜等特性。用于车辆、机车的门窗、冷藏库、冷藏橱柜、工业绝热和隔音材料等。

5. 微晶玻璃

又称陶瓷玻璃，是在玻璃中加入晶核剂（金、银、二氧化钛），经热处理而成。它是一种含有细晶粒陶瓷状材料，质轻而硬，软化点和机械强度高，耐蚀性好，热稳定性高，透明微晶玻璃可用于光学、光电和精密工程，它的膨胀系数近似为零，是一种高均匀性的材料，即使是在数米直径的大小中不同的地方的热性能和力学性能几乎没有偏差。既能做重达几吨的块料，又可做很小的元器件。微晶玻璃是一种完全没有方向性的结构，无孔的表面，晶相和玻璃相有类似的化学性能和硬度，这使得它能用普通光学玻璃的方法进行加工。

微晶玻璃是天文望远镜和X射线望远镜反射镜基片的理想材料，它能克服由于温度的变化带来的反射镜面形的变化，从而提高光学观察质量。

在环形激光陀螺中，微晶玻璃用来做膨胀系数与温度无关的框架，另外它具有低的氦气渗透率使得激光陀螺有更长的使用寿命。

微晶玻璃可应用于以下方面：①大型天文望远镜的反射镜基片（最大直径8.2m）；②环形激光陀螺的框架和反射镜；③气象卫星、光刻系统和彗星探测器的光学元件；④激光谐振腔中长度的标尺；⑤卫星中X射线望远镜的反射镜基片；⑥精密测量技术用作标准测量棒等，还用于火箭头部的雷达罩。

6.7.5 瓶罐玻璃

绝大多数的瓶罐玻璃属于钠－钙－硅玻璃，对化学稳定性要求较高的瓶罐，如医用瓶（如注射用药品）与化工用瓶（酸瓶、试剂瓶），要采用硼硅酸盐玻璃；对于需要遮断紫外线的瓶罐，如啤酒瓶、香槟酒瓶等，还要加入相应的着色剂；对于盛装冷霜的化妆品瓶，则采用乳浊玻璃；高级香水瓶有时采用钡锌晶质玻璃。

第7章　陶　　瓷

7.1　概述

陶瓷材料（主要由 Al_2O_3 和 SiO_2 组成）由于硬度高，对高温、水和其他化学介质有抗腐蚀性以及特殊的光学和电学性能，早已得到广泛的应用。由粘土制成的陶瓷产品是历史上人类制造和使用最早的物品之一。早在原始氏族社会，人类就已经把用粘土制成的罐，经过烧结以后作为盛装食物和水的容器。在整个人类历史时期，以至于在今天，陶瓷仍然在人们的生活中占有相当的比例。

陶瓷作为材料一般分为三类：粘土制品、晶体陶瓷和玻璃。玻璃制品，我们已在上一章介绍过了。至于晶体陶瓷，一般工业中几乎不用，因此在此就不再叙述。

由于粘土容易成型，故粘土制品的应用极为普遍。粘土制品——瓷瓶及瓷罐主要用于各种名贵酒类等的包装和制成餐具、各类容器和实用美术装饰制品之用。其次大量的用于建筑装饰如墙地砖、琉璃制品和陶瓷壁画以及卫生洁具和电气制品等。

7.2　陶瓷材料的一般性能

陶瓷的性能受许多因素影响，范围变化很大，但还是存在一些共同的特性。

7.2.1　力学性能

（1）刚度　由材料的弹性模量衡量，弹性模量反映结合键的强度，所以具有强大化学键的陶瓷都有很高的弹性模量，是各类材料中最高的材料，比金属高若干倍，比聚合物高 2～4 个数量级。各种常见材料的弹性模量和硬度见表 7-1。

表 7-1　各种常见材料的弹性模量和硬度

材　料	弹性模量/MPa	硬度 HV
橡胶	6.9	很低
塑料	1380	17
镁合金	41300	30～40
铝合金	72300	170
钢	207000	300～800
氧化铝	400000	1500
金刚石	1171000	6000～10000

弹性模量对晶粒大小和晶体形态不敏感，但受气孔率的影响很大。气孔降低材料的弹性模量，温度的升高也会使弹性模量降低。

（2）硬度 和刚度一样，硬度也决定于键的强度，所以陶瓷也是各类材料中硬度最高的，这是陶瓷的最大特点。例如，各种陶瓷的硬度多为1000～5000HV，淬火钢为500～800HV，聚合物最硬不超过20HV。陶瓷的硬度随温度的升高而降低，但在高温下仍有较高的数值。

（3）强度 按照理论计算，陶瓷的强度应该很高，为 $E/10 \sim E/5$，但实际上一般只为 $E/1000 \sim E/100$，甚至更低。例如普通玻璃的强度约为70MPa，均约为其弹性模量的千分之一的数量级。表7-2给出了几种典型陶瓷的弹性模量和强度数据。

表7-2 几种典型陶瓷的弹性模量和强度

陶瓷品种	弹性模量/MPa	强度/MPa
滑石瓷	69×10^3	138
莫来石瓷	69×10^3	69
氧化硅玻璃	72.4×10^3	107
氧化硅瓷（90%～95% Al_2O_3）	365.5×10^3	345
烧结氧化铝（5%气孔率）	365.5×10^3	207～345
烧结尖晶石（5%气孔率）	273.9×10^3	90
烧结硅化钼（5%气孔率）	406.9×10^3	690
热压碳化硼（5%气孔率）	289.7×10^3	345

陶瓷的实际强度受致密度、杂质和各种缺陷的影响很大。热压氧化硅陶瓷，在致密度增大，气孔率近于零时，强度可接近理论值，刚玉陶瓷纤维，因为减少了缺陷，强度提高了1～2个数量级；而微晶刚玉由于组织细化，强度比一般刚玉高许多倍。

陶瓷对压力状态特别敏感，同时强度具有统计性质，与受力的体积或表面有关，所以它的抗拉强度很低，抗弯强度较高，而抗压强度非常高，一般比抗拉强度高一个数量级。

（4）塑性、韧性或脆性 陶瓷在室温下几乎没有塑性。陶瓷塑性开始的温度约为0.5Tm（Tm为熔点的热力学温度，K），例如 Al_2O_3 为1237℃，SiO_2 为1038℃。由于开始塑性变形的温度很高，所以陶瓷都有较高的高温强度。

脆性极高是陶瓷的最大缺点，为了改善陶瓷脆性，可以从以下几个方面去努力：第一，预防在陶瓷中特别是表面产生缺陷；第二，在陶瓷表面造成压应力；第三，消除表面的微裂纹。目前，在这些方面已取得了一定的成果。例如，在表面加

预压应力，能降低工作中承受的拉应力，而可作为“不碎”的陶瓷。

7.2.2 物理性能和化学性能

（1）热膨胀 是温度升高时物质的原子振动振幅增大，原子间距增大所导致的体积胀大现象。其膨胀系数的大小与晶体结构和结合键强度密切相关。键强度高的材料热胀系数低，结构较紧密的材料热胀系数大。

（2）导热性 为在一定温度梯度作用下热量在固体中的传导速率。陶瓷的热传导主要依靠原子的热振动。由于没有自由电子的传热作用，陶瓷的导热性能比金属小，受其组成和结构的影响，一般热导率 $\lambda = 10^{-2} \sim 10^{-5} \mathrm{W/m \cdot K}$。陶瓷中的气孔对传热不利，所以陶瓷多为较好的绝热材料。

（3）热稳定性 就是抗热振性，为陶瓷在不同温度范围波动时的寿命，一般用急冷到水中不破裂所能承受的最高温度来表达。例如日用陶瓷的热稳定性为220℃。它与材料的线胀系数和导热性有关。线胀系数大和导热性低的材料的热稳定性不高，韧性低的材料热稳定性也不高。所以陶瓷的热稳定性很低，比金属低得多。这是陶瓷的另一个主要缺点。

（4）化学性能 由于陶瓷的结构非常稳定，因此陶瓷对酸、碱、盐等腐蚀性很强的介质均有较强的抗蚀能力。

由以上讨论可知，陶瓷性能的特点：具有高耐热性、高化学稳定性、不老化性、高的硬度和良好的抗压能力，但脆性很高，温度急变抗力很低，抗拉、抗弯性能差。

7.3 普通陶瓷

7.3.1 普通陶瓷的分类

从产品的种类来说，陶瓷制品可分为陶质、瓷质和炻质三大类，它们的特性分别如下。

1. 陶质制品

陶质制品烧结程度相对较低，为多孔结构，通常吸水率较大（10% ~22%）、强度较低、抗冻性差、断面粗糙无光、不透明、敲击声粗哑，分无釉和施釉两种制品，适用于室内使用。

陶器分为粗陶和精陶两种。粗陶坯料一般由一种或一种以上的含杂质较多的粘土组成，粗陶不施釉，建筑上所用的砖瓦以及陶管、盆、罐和某些日用缸器均属于这一类。精陶指坯体呈白色或象牙色的多孔性陶瓷制品，多以可塑性粘土、高岭土、长石、石英为原料，一般经素烧（无釉坯在高温下的焙烧过程）和釉烧（施釉后再进行焙烧的过程）两次烧成。精陶按其用途不同可分为建筑精陶（如釉面

砖）、美术精陶和日用精陶。

2. 瓷质制品

瓷质制品烧结程度高，结构致密，断面细致并有光泽，强度高，坚硬耐磨，基本上不吸水（ <1%），有一定的半透明性，通常都施有釉层（某些瓷质并不施釉，甚至颜色不白但烧结程度仍是高的）。瓷质制品按其原料的化学成分与工艺制作的不同，又分为粗瓷和细瓷两种。瓷质制品有陶瓷锦砖、日用餐茶具、陈设瓷、电瓷及美术用品等。

3. 炻质制品

炻质制品是介于陶质与瓷质之间的一类陶瓷制品，也称半瓷，其构造比陶质致密，吸水率较小（1% ~10%），但又不如瓷器那么洁白，其坯体多带有颜色，且无半透明性。

炻器按其坯体的致密程度不同，又分为粗炻器和细炻器两种，粗炻器吸水率一般为 4% ~8%，细炻器吸水率为 1% ~3%，建筑饰面用的外墙面砖、地砖等多属于粗炻器。日用器皿、有釉陶瓷锦砖、卫生陶瓷、化工及电器工业用陶瓷等多属于细炻器。

为了便于掌握各种产品的特征，还可以从其他角度加以分类。如根据其基本物理性能（气孔率、透明性、色泽等）分类；根据所用原料或产品的组成分类；根据其用途分类等。

7.3.2　陶瓷原料的成分

由于粘土容易成型，故使用粘土制品当作陶瓷原料的应用极为普遍。粘土基本上是由硅酸铝的水合物、碱土金属（Ba、Ca）氧化物或化合物、碱金属（Na、K）化合物所组成，有时还有铁的氧化物。其主要成分为 Al_2O_3 和 SiO_2，但其熔点很高，分别为 2050℃和 1728℃，由于大部分粘土中还含有其他成分，使得粘土在约 900℃温度范围内将发生某些融合。粘土制品的性能与粘土的成分、原材料颗粒的大小、形状和尺寸分布有密切关系。不同成分的粘土可以制造许多制品，如陶瓷、粗陶瓷和瓷器。

瓷器是最纯的粘土制品，一般由 Al_2O_3 和 SiO_2 组成，其成分范围在 SiO_2 和高铝红柱石（$3Al_2O_3$、$2SiO_2$）之间，即含有 20% ~50% Al_2O_3。为了调整熔点，还加入一些如碱金属氧化物那样的其他物质。

陶器和粗陶瓷也是粘土制品，它们并不是很纯，而且烧成温度较低。陶器制品在成分上并不严格控制，在低温烧成，并有很多孔洞。粗陶瓷在较高的温度烧成，密度也较大。

7.3.3　陶瓷制品的制造

制造陶瓷制品时，要添加水以便使粘土具有可塑性。当其表面覆盖了水分子

时，鳞片状粘土颗粒可以比较自由地彼此运动，并力求彼此平行地排列起来。水分布在粒子之间的间隙处和粒子表面的空洞处。必须给予足够的水，以防止混合物变弱和易碎。这一最少量的水，就是塑性极限。可以加入稍多于这个限度的水，当加入的水达到了上限，即所谓水限后，更多的水则将使粘土变湿、变稀、变粘。粘土所需水的精确数量在很大程度上取决于粘土的类型和粘土颗粒的表面状态。此外，还向粘土中加入一些添加剂，使粘土在制造或使用时具有某些特殊性能。

粘土成型以后，还要干燥和烧成。在干燥时，间隙处的水分蒸发了，干燥粘土的强度比湿的要大一些。干燥速率很重要，如干燥过快，则干燥时的正常收缩将会引起制品的开裂。所以必须控制从表面排出水的速度，使它大致与水通过间隙扩散到表面的速率相等。在干燥以后要进行烧成，烧成分为以下四个阶段。

低温阶段（室温～300℃）：进一步排除坯体中的残余水分。

分解及氧化阶段（300～950℃）：粘土等矿物中化合水的排除（约600℃左右），有机物、碳素和无机物等的氧化；碳酸盐、硫化物等的分解，通过分解与氧化反应，就可除掉粘土中的各种有机和无机杂质。

高温阶段（900℃～烧成温度）：上述氧化、分解反应继续进行。在900℃时开始了制品的融合或玻璃化；当温度增加到900～1400℃时，玻璃化可以进行得相当完全，但实际上很少这样做。这是因为完全融合的粘土制品，虽然强度大，但在生产过程中容易在高温下变软和塌陷。一般粘土制品仅仅部分融合，因而在玻璃基体中还有未反应的 Al_2O_3 和 SiO_2 颗粒。当要求无孔洞的上釉表面时，这时在经过焙烧以后的制品上，涂以低熔点陶瓷成分的表面涂层，随后在较高温度烧成时，使上釉材料变为完全的液体，冷却以后为一层坚固的玻璃。

冷却阶段（烧成温度～室温）。

陶器通常在800～900℃之间烧成。粗陶瓷和瓷器要求更高的玻璃化，特别是瓷器，薄断面处接近完全的玻璃化。

7.3.4 传统陶瓷

传统陶瓷为粘土－长石－石英所组成。长石是由 R_2O、Al_2O_3 组成，长石有钾长石［K_2O、$Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$］、钠长石（Na_2O、$Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$）和钙长石（CaO、$Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$）等。石英（SiO_2）主要来自于石英矿。石英砂的主要成分是石英（即 SiO_2），高质量的石英砂中石英的含量在99.8%以上，其他为 Al_2O_3、TiO_2、CaO、MgO、Fe_2O_3、Na_2O、K_2O 等杂质。改变传统陶瓷组成的配比，控制组成中的杂质和助熔剂，以及细度和致密度，可以获得不同特性的陶瓷。

普通传统陶瓷可分为日用陶瓷和普通工业陶瓷两大类。

1. 日用陶瓷

要求有良好的白度、光泽度、透光度、热稳定性和机械强度，主要为瓷器。按瓷质可分为如下几类。

（1）长石质瓷 它是目前国内外日用瓷中普遍采用的瓷质。主要由长石、石英、高岭土三种原料按一定比例配方而成。长石质瓷瓷质洁白、透明度高、断面呈贝壳状、不透气、吸水率很小、瓷质坚硬、机械强度高。化学稳定性好，适宜制作餐具、茶具、陈设瓷、装饰美术瓷及一般工业制品。

（2）绢云母质瓷 它是我国传统陶瓷之一。这是以绢云母作熔剂的瓷石类粘土和石英为主要原料经配方而成，我国南方一些地区，如景德镇厂生产该陶瓷。因瓷石中 Al_2O_3 含量较低，故必须配入高岭土，烧成温度决定于瓷石和高岭土的配入量，绢云母质瓷的透明度较长石质瓷好，采用还原焰烧成，外观呈“白里泛青”的特色，是我国南方瓷器的传统风格，历史悠久的中国瓷代表。适用于制作餐茶具，工艺美术陈设瓷等。

（3）日用滑石质瓷 它是一种以滑石为主要原料的镁质瓷。日用滑石质瓷的白度、色调、吸水率、机械强度、热稳定性等方面均已达到或超过一般日用细瓷的水平。主要用于高级日用瓷和一般电工陶瓷。

（4）骨灰质瓷 属于软质瓷范畴，始于英国。骨灰质瓷的白度高、透光性好、光泽柔和、吸水率小、烧成温度不高，但热稳定性较差，瓷质较脆。较多用来制造高级日用细瓷和工艺美术陈设瓷。骨灰是脊椎动物的骨骼经一定温度煅烧后的产物，一般采用牛、猪、羊、鱼等动物的残骨或经骨胶厂提胶后的骨渣，经900℃以上高温煅烧而成。如牛羊骨的骨灰组成为：P_2O_5 44.10%，CaO 53.10%，SiO_2 0.44%，Al_2O_3 0.19%，K_2O 0.13%，Na_2O 1.20% 及其他0.83%，骨灰的配入量决定了 $Ca_3(PO_4)_2$ 生成量的多少，它是骨灰瓷的主要晶相。烧成时当温度高于1000℃时，少量的磷酸钙能溶解在长石液相中起到助熔和提高制品的透光性作用。未溶的磷酸钙则可以成为瓷坯的骨架。骨灰质瓷在氧化焰烧成时呈白色，还原焰烧成时则为白中泛绿，原因是亚铁使磷酸钙玻璃相呈浅绿色之故。

对日用陶瓷的要求是洁白、半透明、断面致密、吸水率接近零、较高强度和硬度以及美观、实用等。常见日用陶瓷的配料、性能及应用见表7-3。

表7-3 各类日用陶瓷的配料、性能及应用

陶瓷类型	原料配比（%）	烧成温度/℃	性 能 特 点	主要应用
长石质瓷	长石20~30 石英25~35 粘土40~50	1250~1350	瓷质洁白、半透明、不透气、吸水率低、坚硬、强度高、化学稳定性好	餐具、茶具、陈设、陶瓷器、装饰美术瓷器、一般工业制品
绢云母质瓷	绢云母30~50 高岭土30~50 石英15~25 其他矿物5~10	1250~1450	同长石质瓷，但透明度、外观色调较好	餐具、茶具、工艺美术品

（续）

陶瓷类型	原料配比（%）	烧成温度/℃	性　能　特　点	主要应用
骨灰质瓷	骨灰 20 ~ 60 长石 8 ~ 22 高岭土 25 ~ 45 石英 9 ~ 20	1220 ~ 1250	白度高、透明度好、瓷质软、光泽柔和，但较脆、热稳定性差	高级餐具、茶具、高级工艺美术瓷器
日用滑石质瓷	滑石约 73 长石约 12 高岭土约 11 粘土约 4	1300 ~ 1400	良好的透明度、热稳定性、较高的强度和良好的电性能	高级日用器皿、一般电工陶瓷

日用瓷的主要性能见表 7-4。

表 7-4　日用瓷的主要性能

性能	数值	性能	数值
密度/（g/cm^3）	2. 3 ~ 2. 5	表观密度/（kg/m^3）	（2. 2 ~ 2. 4）$\times 10^3$
开口孔率（%）	0 ~ 0. 5	吸水率（%）	0 ~ 0. 5
莫氏硬度（相对值）	7 ~ 8	弹性模量/MPa	（73. 5 ~ 78. 4）$\times 10^3$
抗压强度/MPa	392 ~ 441	抗折强度/MPa	39. 2 ~ 63. 7
抗拉强度/MPa	23. 5 ~ 31. 36	冲击强度/（J/m^2）	1. 76 ~ 2. 06
热胀系数（20℃、100℃）/（1/℃）	（2. 5 ~ 4. 5）$\times 10^{-6}$	热导率［W/（m · K）］	0. 00796 ~ 0. 0105
平均比热容（20℃、1000℃）/（J/kg）	8381047. 5	瓷化温度/℃	1300 ~ 1500
耐火度/℃	1530 ~ 1710	热稳定性	220℃不开裂

2. 普通工业陶瓷

普通工业陶瓷主要分为炻瓷（又称半瓷）和精陶；按用途分为建筑陶瓷、卫生陶瓷、电气绝缘陶瓷和化工陶瓷等。

（1）建筑陶瓷　它是以粘土为主要原料经配料、制坯、烧成而得到的用于建筑上的陶瓷材料。建筑陶瓷根据所用原料可分为三类：粗陶器（以难熔粘土为主要原料）包括砖、瓦以及陶管、盆、罐和某些日用缸器等；精陶器（以瓷土或高岭土等为主要原料）包括釉面砖、锦砖、建筑卫生器皿、日用器皿、缸器以及化学（或电器）工业用品等；炻瓷（以陶土或粘土为主要原料）包括外墙砖、地砖、耐酸瓷砖、日用炻瓷和陈设品等。以下介绍几种常用的建筑陶瓷。

1）釉面砖：又称瓷砖，是由瓷土烧成。用于薄板状的精陶用品，要求尺寸一致、颜色均匀、无缺釉（脱釉）、表面光滑平整、防火、防水、耐蚀性和热稳定性良好等。形状有正方、长方以及阳条角、阴条角和各种阴、阳角砖。釉面瓷砖有白色、彩色、印花、图案等多个品种。可作为浴室、试验室的台面以及内外墙的贴

面，是国内外目前消耗量最大的一个品种。

2）陶瓷锦砖（又称马赛克）：是以优质瓷土烧制而成的小块瓷砖，是地砖的一种，有施釉和不施釉两种，其形状规整、尺寸公差小、强度高、耐磨、耐蚀、易于清洗、不吸水、美观大方等待点。形状有正方、长方、对角、斜长条和六角等规格，其厚度一般为5mm。陶瓷锦砖拼花产品一般出厂前均已按各种图案反贴在牛皮纸上，每张为一联，每40张为一箱。国外采用尼龙网铺贴成卷式锦砖，又称地毯式马赛克，主要用于室内地面铺设。

3）铺地缸砖：又称铺路砖。以难熔粘土为原料，在一定压力下成型，经烧结而成。有格面、光面两种，形状有正方、长方、六角等。表面光泽较低、质地紧密、强度高、耐磨性好。主要作为平台、阳台及人行便道等铺地之用。

（2）卫生陶瓷　它是用于卫生设施的带釉陶瓷制品。一般有陶质、炻瓷质和瓷质，上白釉或色釉。主要以高岭土为主要原料，采用注浆成型法，经烧结而成。我国的卫生陶瓷主要是炻瓷质，国外多属于瓷质。卫生陶瓷吸水率小、强度高、耐腐蚀、经久耐用，但自重过大，尺寸难以准确，且质脆易碎。主要有洗面器、浴盆、水箱、存水弯管及卫生器具等，多用于卫生间和洗涤间等。

（3）电气绝缘陶瓷　又称电瓷，是作为隔电、机械支持及连接用的瓷质绝缘器件。电瓷主要原料是粘土、长石和石英等矿物。实用电瓷坯料类型主要有高硅质、高铝质和铝硅质三类，即高硅瓷、高铝瓷和普通瓷。电瓷所用釉料主要是高温长石釉，一般分为白釉、棕釉和天蓝釉三种颜色。如棕色用于户外和高压瓷件，它具有吸热特点，使附着表面的水分易于蒸发，可保持干燥以减少漏电。电瓷按工作电压分为低压电瓷（小于1kV）、高压电瓷（1～110kV）和超高压电瓷（大于110kV）；按用途分为线路类电瓷、电器类电瓷和电站类电瓷。根据电瓷绝缘子在工作中所受的各种负荷，对其性能要求如下。

1）电性能：一般以在油中被击穿的电压表示其极限强度，即单位厚度的绝缘子在均匀电场中被击穿的电位梯度，单位为kV/mm。瓷体中的气孔对介电强度影响很大，所以电瓷制品要求吸水率为零，并尽量减少瓷体中的闭口气孔。

干弧电压：在工频和标准大气压状态下（大气压力为0.1MPa，湿度为11g/m^3，温度为20℃）干燥清洁的绝缘子表面呈现连续而强烈的放电现象时，两极间的最低电压为干弧电压（kV）。

湿弧电压：电瓷表面潮湿时，两极间放电的最低电压为湿弧电压（kV）。

2）力学性能：绝缘子在承受导线质量和自然界力的机械作用时，支柱内主要承受弯曲应力，悬式类则承受拉应力，因而瓷体的抗弯或坑拉强度起很重要的作用。一般要求上釉瓷体抗弯强度达到54MPa，抗拉强度达到44MPa以上。

3）耐冷热急变的性能：绝缘子安装在户外要能承受炎热和寒冷的气候，尤其要能承受气温的突然变化时，瓷体内外温度梯度所产生的温度应力。一般线路绝缘子要求耐三次70℃的温差，电站、电器类为60℃。

4）耐污性：户外绝缘子受到大气中的尘埃、工业废气和雾露的污染和润湿，表面产生闪弧，严重影响绝缘性能，因此要求表面有较好的防污性。

（4）化工陶瓷　用于化学工业的陶瓷制品。性能上要求耐酸、耐高温、一定强度和热稳定性。因此，在化工陶瓷坯料中要求钾、钠含量尽量少。石英多则耐酸性好，但热稳定性差，且硅铝比高烧成范围窄。因此，SiO_2 含量为 60% ~ 70%，Al_2O_3 为 24% ~30%。如在坯料中配入 MgO、ZnO、BaO 等氧化物，可以增加瓷坯中莫来石晶体相，提高制品强度、耐酸性、降低热膨胀性；如配入 Al_2O_3、ZrO_2 等氧化物，提高强度、热稳定性；配入 SiC 提高强度和导热性等。化工陶瓷一般采用氧化焰烧成，温度为 1260 ~ 1350℃。对于化学化工瓷主要要求耐各种化学介质的能力强，因此加入 MgO、ZnO、BaO、Cr_2O_3 等氧化物，以提高强度和耐碱能力；加入 Al_2O_3、ZrO_2 等提高强度和热稳定性；加入滑石或镁矿石降低热胀系数；还可加入 SiC 来提高导热性和强度。化学瓷和化工瓷是化学、化工、制药、食品等工业和实验室中的重要材料，用于制作实验器皿、食品及医药包装容器、耐蚀容器等。

普通工业陶瓷的基本性能见表 7-5。

表 7-5　普通工业陶瓷的基本性能

种类	建筑陶瓷	高压陶瓷	耐酸陶瓷
密度/（g/cm^3）	2.2	2.3 ~ 2.4	2.2 ~ 2.3
气孔率（%）	5	—	<6
吸水率（%）	3 ~ 7	—	<3
抗压强度/MPa	568.4 ~ 893.6	—	80 ~ 120
抗拉强度/MPa	10.8 ~ 51.9	23 ~ 35	8 ~ 12
抗弯强度/MPa	40 ~ 96	70 ~ 80	40 ~ 60
冲击强度/（J/m^2）	—	1.8 ~ 2.2	11.5
热胀系数/（1/℃）	—	—	（4.5 ~ 6.0）$\times 10^{-6}$
介电常数	—	67	—
损耗角正切	—	0.02 ~ 0.04	—
体积电阻率/（Ω · m）	—	$>10^{11}$	—
莫氏硬度	7	7	7
热稳定性/℃	250	150 ~ 200	200
热导率/［W/（m · K）］	1.5	—	0.92 ~ 1.04

7.4　釉

釉是覆盖在陶瓷坯体表面的玻璃质薄层（平均厚度为 120 ~ 140μm）。它使陶

瓷制品表面密实、光亮、不吸水、抗腐蚀、耐风化、易清洗，彩釉和艺术釉还具有多变的装饰作用。

7.4.1　釉的特点、性质及制釉原料

1. 釉的特点

釉是一种玻璃质材料，具有玻璃的通性：无确定的熔点，只有熔融范围，硬、脆、各向同性、透明、具有光泽，而且这些性质随温度的变化规律也与玻璃相似。但釉毕竟不是玻璃，与玻璃有很大差别。首先，釉在熔融软化时必须保持黏稠而且不流坠，以满足烧制过程中不在坯体表面流走，特别是在坯体直立情况下不致形成流坠纹（某些特意要形成流纹的艺术釉除外）。其次，在焙烧过程的高温作用下，釉中的一些成分挥发，且与坯体中的某些组成物质发生反应，以致使釉的微观结构和化学成分的均匀性都比玻璃要差。

2. 釉的性质

为满足陶瓷制品对釉的要求，釉必须具有以下性质：

1）釉料必须在坯体烧结温度下成熟，一般要求釉的成熟温度略低于坯体烧成温度。为适应一次烧成技术，釉应具有较高的始熔温度和较宽的熔融温度范围。

2）釉料要与坯体牢固的绕合，其热胀系数接近或略小于坯体的热胀系数（某些特殊的装饰釉除外），以保持在使用过程中，遇到温度变化情况，不致发生开裂或釉面脱离现象。

3）釉料在高温熔融软化后，要有适当的粘度和表面张力以保证冷却后形成平滑的釉面层。

4）釉面应质地坚硬、耐磕碰、不易磨损。

一般釉的主要性能见表 7-6。

表 7-6　釉的主要性能

始熔温度/℃	不高于 1150 ~ 1200
成熟温度/℃	1300 ~ 1450
高温流动度（斜槽法，mm）	30 ~ 66
平均膨胀系数（1×10^{-6}/℃，20 ~ 100℃）	2.9 ~ 5.3
釉面显微硬度 HV	6000 ~ 9000
热稳定性/℃	220 不裂
光泽度（%）	大于 90
白度（%）	大于 80

3. 制釉原料

釉所使用的原料有天然原料和化工原料助剂两类。天然原料基本与坯体所使用的原料相同。只是釉料要求其化学成分更纯、杂质更少。除天然原料外，釉的原料

还包括一些化工原料作为助剂，如助熔剂、乳浊剂和着色剂等。

天然原料经常采用的是高岭土、长石、石英、石灰石、滑石、含锂矿物、含铁矿物等。

助剂常采用的化工原料为：作为助熔剂的工业硼砂、硝酸钾、碳酸钙、氧化锌、铅丹、氟硅酸钠等；作为乳浊剂的工业纯氧化钛、氧化锑、氧化锡、氧化锆、氧化铈等；作为着色剂的钴、铜、锰、铁、镍、铬等元素的化合物。

7.4.2 釉的分类

釉的成分极为复杂，各品种的烧制工艺不同，适宜使用的陶瓷种类也不一样，釉常见的分类见表 7-7。

表 7-7 釉的分类

分类方法	种 类
按坯体种类	瓷器釉、炻器釉、陶器釉
按化学组成	长石釉、石灰釉、滑石釉、混合釉、铅釉、硼釉、铅硼釉、食盐釉、土釉
按烧成温度	低温釉（1100℃以下）、中温釉（1100～1300℃）、高温釉（1300℃以上）
按制备方法	生料釉、熔块釉
按外表特征	透明釉、乳浊釉、有色釉、光亮釉、无光釉、结晶釉、沙金釉、碎纹釉、珠光釉、花釉、裂纹釉、电光釉、流动釉

1. 常用釉料

（1）长石釉和石灰釉　是瓷、炻和精陶采用最多的两种釉料，一般都是由长石、石灰石、石英、高岭土、粘土、废瓷粉等组成。成熟温度大于 1250℃，属高温釉，也是透明釉的一种。长石釉的釉料中 SiO_2 含量多，而碱性氧化物（Na_2O、K_2O）含量少。这种釉的特点是硬度大、光泽度高、透明、略呈白色、色泽柔和、烧结温度范围较宽、与含 SiO_2 高的坯体结合良好。

石灰釉是我国传统陶瓷制品中应用历史最长的一种釉料，直接由石灰石和其他原料配制。这种釉弹性好、有刚硬感、透明，利于釉下彩的显色。可制成透明釉、无光釉和乳浊釉。与 Al_2O_3 含量高的坯体结合良好。石灰釉的缺点是烧成温度较窄、白度差、在以煤为烧成燃料时，控制不好易产生气泡或烟熏等缺陷。近年来，石灰釉已逐渐被其他新釉种所替代。

（2）滑石釉和混合釉　滑石釉是在长石釉、石灰釉的基础上发展起来的，即在釉料中加入了滑石。其特点是烧成温度范围较宽，白度高，透明度好，对坯体适应性强，不易产生开裂、烟熏等缺陷，但存在着与坯体结合力欠佳、釉面不及石灰釉光亮、有油脂光泽等缺点。

为改善单一釉用原料的特性，近代釉料逐渐向多原料、多种助剂组成发展。混合釉即是一种以长石、石英、高岭土等天然原料和多种助熔剂（滑石、白云石、

方解石、氧化锌等）组成的一种釉料。这种釉的特点主要是可根据坯体的特性和制品的使用特点，进行多种配比选择，以获得最满意的使用效果。

（3）透明釉和乳浊釉 透明釉是指釉料涂于坯体表面，经高温焙烧后形成的玻璃体层，透明度高，可呈现坯体本身的颜色。白色釉面砖就是由透明釉透视坯体的白颜色而形成洁白光滑的表面效果。有时还可由透明釉显示和保护釉下的彩色图案。

乳浊釉是一种作用与透明釉正相反的釉种，它主要是为了掩盖不够洁白的坯体、坯体表面的缺陷或显示特殊的效果而人为在釉料中加入乳浊剂，产生细微晶粒或极细微气泡而生成乳浊效果。常掺加的乳浊剂为 SiO_2、ZrO_2、TiO_2 等。

（4）生料釉和熔块釉 生料釉是指全部釉料都不经熔制，直接加水搅拌成料浆后施于坯体，在高温焙烧时，相互熔融而成为釉层整体。长石釉、石灰釉、滑石釉、混合釉均为生料釉。

熔块釉是先将部分釉料混合、磨细，熔融成块料，水淬成小块（称为熔块），再与其他原料混合、磨细而成熔块釉，使用时与水拌和，施于坯体之上，再次焙烧而成釉面层。熔块釉多用于低温釉料。为降低熟化温度，往往要掺低熔点的助剂，有些助剂（如铅的化合物）有毒性，使用时要引起注意。

（5）色釉 在釉料中加入着色的金属氧化物或它们的盐类，在熔烧后可使釉层呈现各种艳丽的色彩。如以铜、铁、钴、铬、锰的化合物为主的着色剂可分别制成红、青、蓝、绿、棕等色釉。色釉因制作简便、价格低而得到广泛应用，但通常不单独使用，而与陶瓷的其他装饰方法配合使用。色釉的缺点是容易在坯体棱边发生“露白”现象和出现流釉、深浅不均等弊病。

（6）土釉 是采用天然有色粘土（内含各种着色氧化物）与长石、方解石等配合，经加工制备而成的釉料，由于粘土本身即含有着色氧化物，所以熟化后自然呈现赤黄、铁红、黑等不同色调。该种釉料有熟化温度低、光泽好、价格低等特点。

（7）食盐釉 是一种在形成和施釉方法上都很独特的釉种。这种釉不是将釉料预先涂于坯体表面再烧成，而是在坯体烧成即将结束时，在窑炉内投入食盐（或同时加少量的煤粉），食盐在窑炉内的高温和水气的共同作用下分解成 Na_2O 和 HCl，Na_2O 直接作用于坯体表面，与坯体中的 $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 或游离的 SiO_2 反应生成玻璃质的釉层（$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$）。该种釉具有釉层薄（仅 0.025mm）、与坯体结合牢固、耐久、不开裂、不脱落、耐酸性强等特点。如坯体中含有铁或碱金属氧化物，还可形成灰、黄至棕红色的彩色釉层。

2. 装饰釉

装饰釉是指以产生不同的装饰效果为主要目的的釉。不同的装饰釉通过色彩的组合、结晶形式的变化、釉面立体效果、不同程度的光泽，形成各自独有的特色，在近代建筑陶瓷中得到广泛的应用。

（1）彩绘　是在坯体上用人工或印刷、贴花转移等方法制成各种图案，形成釉层部分的陶瓷装饰方法。根据彩绘的形成在釉层下还是在釉层上分为釉下彩绘和釉上彩绘两种。

釉下彩绘是在生坯或素烧后的坯体上进行彩绘，然后在其上施一层透明釉或半透明釉，再釉烧而成（釉烧在后）。由于受后施釉面层烧成温度的影响，一般釉下彩绘所用的颜料为高温颜料，种类较少，生成的颜色不够丰富。常选用的矿物颜料有氧化钴（青色）、铜红（红色）、锑锡黄（黄色）、氧化锰（红色）等。釉下彩绘的特点是彩绘有釉层作保护，所以图案耐磨损，釉面清洁光亮，使用过程中颜料不溶散，使用较安全（因有些矿物颜料有毒性）。但釉下彩绘色彩不够丰富，难以机械化生产。我国历史上有名的青花瓷即为釉下彩绘，釉里红、釉下五彩是近代有名的釉下彩品种。

釉上彩绘采用釉烧过的坯体，在釉层上用低温颜料（600～900℃烧成）进行彩绘，而后进行彩烧而成（釉烧在前）。釉上彩绘采用的是低温颜料，所以几乎可以采用全部的陶瓷颜料，颜色丰富多变。由于是在已釉烧过的较硬的釉面上彩绘，所以可用各种装饰法进行图案的制作，生产效率高，成本低，价格便宜，是应用广泛的一种陶瓷装饰工艺。釉上彩绘由于彩绘颜料上没有釉层保护，所以图案易磨损，且在使用中颜料所加的含铅助熔剂可能溶出，对人体产生有害影响。釉上彩绘图案的制作有人工绘制、贴花、喷花、刷花等。贴花是在纸或塑料薄膜上印制各种图案，然后将其贴于制品上，使图案彩料转移到釉面上。喷花和刷花是预先制作各种图案的镂空板，然后用压缩空气喷枪或涂刷工具将彩料透过镂空处施于釉面上得到图案。

（2）贵金属装饰　所谓贵金属装饰是指将金、银、铂等贵金属，用各种方法置于陶瓷表面而形成富有贵金属色泽的图案，具有华丽、高贵的效果，是高级陶瓷制品的一种艺术处理方法。贵金属装饰中最常采用的是饰金装饰。它是采用纯金溶于溶剂中，然后绘于釉面之上，经彩烧（不大于900℃）直接或再经抛光形成闪光的金膜。所形成的金膜膜层很薄，最薄的只有0.05μm，即每平方米只含金1g，最厚的也不过0.5μm左右。高档釉面砖常采用饰金装饰来进行图案的描边处理，具有良好的装饰效果，但由于纯金较软，易于磨损，所以该种釉面砖使用部位要慎重选择。

（3）结晶釉和砂金釉　这两种装饰釉共同的特点是在烧成后的釉层中形成各种结晶形式，宏观上呈现晶体光泽，构成晶莹闪亮的装饰效果。

结晶釉是指釉面分布着针状、星形或花叶形粗大聚晶体的一种装饰釉，其釉层较厚，约1.5～2mm。该种装饰釉主要是采用ZnO、MnO_2、TiO_2等作为成晶物质以形成晶核，在其析晶温度范围内进行必要的保温，以促进晶核的发育成长。通过选择不同的保温时间和保温温度，可获得不同大小和形状的晶花。

砂金釉因在釉面中可形成类似于天然砂金石一般的细结晶而得名，可呈现金子

般的光泽，这些光泽是由氧化铁结晶体或氧化铬晶体产生的，根据结晶粒度的大小可显现黄色或红色，结晶越多，透明性越差。

（4）光泽彩 又名电光釉，是在釉烧过的釉面层上施涂一层金属或金属氧化物，经600～900℃的熔烧，形成使入射光和反射光能产生衍射的薄膜，可映现出彩虹般衍射光泽的装饰釉。光泽彩与釉上彩相似，彩料可用刷涂或喷涂的方法施于釉烧过的坯体上。常用的有色泽特点各异的钴石光泽彩、黄色光泽彩、铁红光泽彩、驼色光泽彩、灰色光泽彩等。

（5）裂纹釉 是根据所需的装饰效果而特意在釉层形成大小不一、形状各异的裂纹的一种装饰釉。裂纹釉的线胀系数大于坯体的线胀系数，在焙烧后迅速冷却的过程中，釉面处于受拉应力状态，由于釉属于脆性材料，所以在足够的拉应力状态下产生裂纹。

根据裂纹颜色呈现方法的不同可分为夹层裂纹釉和镶嵌裂纹釉两种。前者是将一层色釉施于另一层不同色调的色釉之上，烧成后表面一层釉产生裂纹，而裂纹颜色则是底层色釉的颜色。后者是用糖液或低温彩料嵌于裂纹中，再经一次彩烧，则裂纹呈现不同的颜色。

（6）无光釉 其特点是没有一般釉层对光的强烈反射，在平滑表面上显现丝状、绒状细纹，对光产生漫反射，从而降低其光泽，产生特殊的艺术效果。无光釉工艺的关键是釉烧后要缓慢冷却，如冷却速度过快，则会失去其无光特点。无光釉属于一种珍贵的艺术釉种。

（7）流动釉 又称流纹釉，是在釉烧过程中，提高其焙烧温度，使釉料处于过烧状态，粘度下降，具有一定的流动性，在重力作用下，釉沿坯体的倾斜或直立表面形成自然流纹，也是一种艺术釉。要注意的是流动釉的成熟温度与坯体的烧成温度间要有足够的间距，以使釉在过烧的流动状态下，坯体仍不会发生软化。流动釉通常都着色，以获得多种色调。

7.5 琉璃制品

建筑琉璃制品是我国传统的极富民族特色的建筑陶瓷材料。早在北魏年间（公元380～543年）就已有琉璃瓦的生产。到唐代，琉璃制品无论在品质和艺术效果方面都达到了很高的成就，特别是在山西各地非常盛行，以晋南的三彩法花釉称著于世。在近代，由于它具有独特的装饰性能，不但仍用于古典式建筑物，也广泛用于具有民族风格的现代建筑物。

琉璃制品用难熔粘土制成坯泥，制坯成型后经干燥、素烧、施色釉、釉烧而成。随着釉料的不同，有的也可一次烧成。中国古代建筑的琉璃制品分瓦制品和园林制品两大类。琉璃瓦制品主要用于各种形式的屋顶，有的是专供屋面排水防漏的；有的是构成各种屋脊的屋脊材料；有的则纯属装饰性的物件，其品种很多，难

以准确分类。一般习惯上可分为瓦类（筒瓦、板瓦、勾头、滴水等），脊类（正脊筒瓦、垂脊筒瓦、三连砖、当勾等），饰件类（正吻、吞脊兽、垂兽、仙人等）。园林琉璃制品有窗、栏杆等。

琉璃制品的特点是质细致密、表面光滑、不易沾污、坚实耐久、色彩绚丽、造型古朴，富有民族特点。常见的颜色有金黄、翠绿、宝蓝等。

琉璃瓦造型复杂，制作工艺较繁，因而造价高。故主要用于体现我国传统建筑风格的宫殿式建筑以及纪念性建筑上，还常用以制造园林建筑中的亭、台、楼、阁，构建古代园林的风格。琉璃制品还常用作近代建筑的高级屋面材料，用于各类坡屋顶，可体现现代与传统的完美结合，富有东方民族精神，富丽堂皇、雄伟壮观。

第8章　金　　属

8.1　金属材料及分类

金属材料是指由一种金属元素构成，或以一种金属元素为主，掺有其他金属或非金属元素所构成的材料的总称。金属材料具有强度高、塑性好、材质均匀致密、性能稳定、易于加工等特点，是工程材料中最主要的品种。金属材料以其闪亮的光泽、坚硬的质感、特有的色调和挺拔的线条用于建筑装饰、室内外雕塑等各种装饰艺术领域。

金属材料的分类如下：



8.2　金属热处理工艺基础

8.2.1　简介

热处理是将固态金属或合金采用适当的方式进行加热、保温和冷却以获得所需

要的组织结构与性能的工艺。热处理的工艺过程可用温度—时间为坐标的工艺曲线表示，见图 8-1。

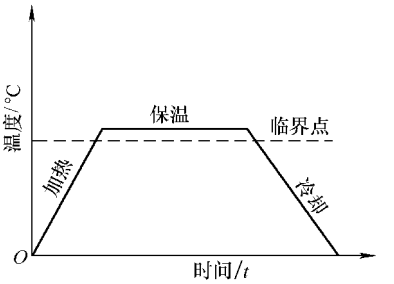


图 8-1　热处理工艺曲线

热处理在机械制造中有着十分重要的作用。它不仅可以改善材料的工艺性能，消除或降低在其他加工过程中所产生的内应力和组织上的某些缺陷，更重要的是可发挥金属材料的潜力，进一步提高力学性能，延长零件的使用寿命，节省金属材料，提高产品的质量。据统计，在机械制造业中 60% ~80% 的零件都要进行热处理，尤其是工具类和滚动轴承几乎百分之百的都要进行热处理。

根据热处理的目的、加热和冷却方法不同，常把热处理大致分为以下几种：

1）普通热处理：退火、正火、淬火、回火。

2）表面热处理：表面淬火有火焰淬火、感应淬火等。化学热处理如渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗金属等。

8.2.2　钢的退火与正火

常用热处理工艺可分两类：预备热处理和最终热处理。预备热处理是为调整原始组织，以保证工件最终热处理或（和）切削加工质量，预先进行的热处理工艺。如钢的退火和正火一般是对毛坯进行热处理，以改善和消除在毛坯制造过程中所产生的某些缺陷，为后续的加工和热处理作好性能和组织的准备，因此退火和正火通常称为预备热处理。最终热处理（如淬火、回火）是为了使成品的使用性能达到要求。但当工件性能要求不高时，退火和正火也可作为最终热处理。

1. 退火

将钢件加热到适当温度，保持一段时间，然后缓慢冷却（通常随炉冷却或者是灰冷、砂冷等，冷却速度约为 100℃/h）的热处理工艺称为退火。

退火的主要目的是降低或调整硬度以便于切削加工；改善或消除钢件的不良组织缺陷（如进行细化晶粒等）；消除或降低内应力；提高塑性和韧性，改善钢的力学性能等。便于切削加工和冲压；为后续工序作好组织准备。

根据钢的成分、原始组织和不同目的，退火可分为：均匀化退火（扩散退火）、完全退火、球化退火、等温退火、去应力退火和再结晶退火等。退火工艺介绍如下：

（1）均匀化退火（扩散退火）　是以减少工件化学成分和组织的不均匀程度为主要目的，将其加热到高温，并长时间保温，然后缓慢冷却的退火。其加热温度一般为 1050 ~1150℃。主要用于质量要求高的合金钢铸坯、铸件或锻件。

（2）完全退火　是把钢加热到要求的温度，保温后随之缓慢冷却以获得近似

平衡组织的退火工艺。完全退火常用于含碳量小于 0.8% 的碳素钢。其目的是细化晶粒、消除内应力、降低硬度以便冲压或切削加工。主要用于钢的铸、锻、焊件及钢锭等。

（3）球化退火　对于含碳量大于 0.8% 的碳素工具钢、合金工具钢、轴承钢等常采用球化退火，球化退火能使钢中碳化物球状（或颗粒状）化，碳素工具钢球化退火的加热温度为 760 ~ 780℃。球化退火后的显微组织是渗碳体及珠光体中的片状渗碳体都得到球状化（粒状）。其目的是降低硬度，改善切削加工性能，并为后序热处理做好组织准备。若钢的原始组织中有严重的网状渗碳体，则在球化退火之前应进行正火消除，以保证球化退火效应。球化退火主要用于工具钢、轴承钢等。

（4）去应力退火　是为去除工件塑性形变加工、切削加工或焊接造成的内应力及铸件内存在的残留应力而进行的退火。去应力退火时不改变钢的内部组织，其加热温度为 600 ~ 700℃。其目的是为了消除内应力，稳定工件的尺寸、减少变形。去应力退火通过原子扩散消除残留应力，不发生相变。

（5）再结晶退火　是经冷塑性变形的工件加热到再结晶温度以上，保持适当时间，通过再结晶使冷变形过程中产生的晶体学缺陷基本消失，重新形成均匀的等轴晶粒，以消除形变强化和残余应力的退火工艺。一般钢的再结晶温度为 650 ~ 700℃。其目的是消除因冷压塑性变形而引起的加工硬化现象，以便继续冷塑性变形（如冷拉拔等）、减少钢件变形和开裂。

2. 正火

正火是将钢件加热到要求的温度，保温适当的时间后，在静止的空气中冷却的热处理工艺。正火的冷却速度比退火冷却速度快，所以能获得较细的组织和较高的力学性能，而且生产周期较退火短。低碳钢可通过正火处理提高强度和硬度，以改善切削加工性能；中碳钢进行正火处理可直接用于性能要求不高零件的最终热处理或代替完全退火；对于含碳量大于 0.8% 的钢，可用正火来消除二次网状渗碳体，为球化退火和淬火工艺作好组织准备。

正火与退火从所得到的组织上没有本质区别，其目的均可细化晶粒、改善组织和改善切削加工性能，但正火的生产效率高、成本低。因此，一般普通结构件应尽量采用正火代替退火。

碳钢的各种退火、正火工艺曲线示意图见图 8-2。

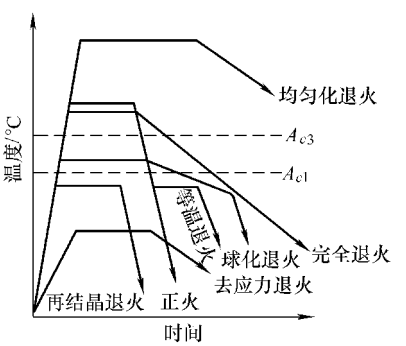


图 8-2　碳钢的各种退火、正火工艺曲线示意图

8.2.3　钢的淬火与回火

机械零件使用状态下的性能，一般由淬火

和回火获得，所以淬火和回火称为最终热处理。重要的机械零件通常都要经过淬火和回火热处理，以提高零件的性能，充分发挥钢的潜力，使零件既可承受较大负荷，又可使其尺寸变小，且提高了零件的使用寿命。故淬火和回火热处理是零件制造过程中十分重要的环节。

1. 淬火

淬火是将钢加热到临界点以上某一温度，保持一定时间，然后以大于临界冷却速度的速度冷却获得马氏体组织的热处理方法。马氏体是指碳在 α－Fe 中的过饱和固溶体（在室温下 α－Fe 中正常的含碳量仅为 0.006%，马氏体的含碳量远远高于此值），其硬度取决于碳的过饱和程度（但比淬火前钢的硬度高得多），即随钢的含碳量增大，马氏体的硬度增高，如碳素工具钢淬火后硬度大于 60HRC。

临界点是指钢在加热或冷却过程中发生组织变化的温度。淬火时钢的加热温度要略高于临界点的温度，以使铁素体和珠光体（铁素体与渗碳体的机械混合物）转变为奥氏体。

临界冷却速度是指淬火冷却过程中奥氏体向马氏体转变时的最小冷却速度。所以淬火冷却时的冷却速度要大于临界冷却速度，但也不能太快，否则会引起零件的变形或开裂。钢加热后的冷却都在淬火冷却介质中进行，碳素钢常用的淬火冷却介质为水溶液，而合金钢常用油作淬火冷却介质。水溶液的冷却能力大于油，所以一般碳钢用油冷却淬不硬。合金钢用水溶液淬火易淬裂。

最常见的淬火有水冷淬火、油冷淬火、空冷淬火等。

淬火方法是根据工件特点（化学成分、形状尺寸和技术要求等）结合各种淬火冷却介质的特点，保证淬火质量所采用的方法。

（1）单介质淬火（单液淬火） 将工件加热到奥氏体化后，浸入一种淬火冷却介质中连续冷却至室温的操作方法称为单液淬火。通常非合金钢件在水中冷却，合金钢件在油中冷却。

单液淬火操作简便，但工件易产生淬火应力，引起变形或裂纹。淬火应力包括热应力和组织应力。热应力是工件在淬火冷却过程中各部分温度不一，而引起不均匀收缩产生的应力；组织应力是工件各部位马氏体转变时间不一和马氏体的比体积过大而引起的应力。淬火应力是不可避免的，所以淬火变形也是不可避免的。

（2）双介质淬火（双液淬火） 工件加热奥氏体化后先浸入一种冷却能力强的淬火冷却介质，浸入冷却能力强的淬火冷却介质，在组织即将发生马氏体转变时立即转入冷却能力弱的淬火冷却介质中冷却。例如先水后油等。

双液淬火接近理想冷却速度，减少了淬火应力和变形或开裂倾向，适用于形状复杂工件的淬火工艺，但不易操作。

（3）马氏体分级淬火（分级淬火） 工件加热奥氏体化后浸入要求一定温度的碱浴或盐浴中，保持适当时间，在工件整体达到介质温度后取出空冷以获得马氏体的淬火。

分级淬火接近理想冷却速度，减少了淬火应力和变形或裂纹倾向，该方法较双液淬火容易控制，一般适用于尺寸较小或形状复杂小型工件的淬火工艺。

（4）贝氏体等温淬火（等温淬火） 工件加热奥氏体化后快冷到贝氏体转变温度区间等温保持，使奥氏体转变为贝氏体的淬火。等温淬火产生的淬火应力与变形极小，适用于小型复杂工件和弹簧零件的淬火工艺。

（5）冷处理 工件淬火冷却到室温后，继续在一般制冷设备或低温介质中冷却的工艺称为冷处理。工件淬火后继续在液氮或液氮蒸气中冷却的工艺称为深冷处理。冷处理和深冷处理一般在0℃以下进行，其目的是为减少钢中残留奥氏体量，以获得最多的马氏体，以便提高硬度，稳定尺寸。一般适用于量具、精密零件等。

2. 回火

淬火后的钢件，虽然有较高的强度和硬度，但脆性增加，并有较大的内应力，故一般淬火后的零件不能直接使用，必须进行回火，以消除或降低内应力，提高韧性，调整力学性能，以满足零件的使用要求。

回火是钢件淬硬后加热到某一温度，保温一定时间，然后冷却到室温的热处理工艺。因为淬火后钢的组织通常是马氏体和残留奥氏体，它们均为不稳定相，在一定的条件下具有向稳定相转变的自发倾向；马氏体的硬度高、韧性低；淬火应力大、工件易变形或裂纹。所以淬火的工件要进行回火处理。

淬火钢件回火的主要目的是稳定组织和形状尺寸；消除淬火应力；调整硬度、提高韧性，以获得所需要的力学性能。

根据零件性能要求不同，热处理生产中常按回火温度分为低温回火、中温回火和高温回火。钢件的回火组织与力学性能也将随回火温度而改变。

1）低温回火：工件在250℃以下进行的回火。淬火马氏体组织回火时，碳已经部分地从固溶体中析出并形成了过渡碳化物，称为回火马氏体。其性能具有很高硬度（58～65HRC）、高耐磨性，内应力及脆性有所降低，韧性有所提高。但仍可保持淬火零件的硬度和耐磨性。碳素工具钢、低合金工具钢、冷作模具钢等淬火后一般要进行低温回火。因此对要求高硬度、高耐磨性的零件（如各种刃具、量具、滚动轴承、冷作模具和渗碳件等）常采用低温回火。

2）中温回火：淬火钢件在250～500℃之间的回火称为中温回火。经中温回火后可使淬硬件的内应力大部分消除，使零件具有较高的硬度（40～50HRC）、较高弹性极限、较高屈服强度、保持足够的塑性和韧性。中温回火常用于弹簧、发条、热锻模和其他弹性元件等零件。

3）高温回火：淬火钢件在500℃至临界点之间的回火称为高温回火。钢件经高温回火后，淬硬件中的内应力可完全消除，使零件获得强度、硬度、塑性和韧性都较好的综合力学性能。高温回火后的硬度约为25～32HRC。所以高温回火适用于要求综合力学性能高的重要结构零件，如轴、曲轴、连杆、螺钉、齿轮等。热处

理生产中把工件淬火并高温回火的复合热处理工艺称为调质。

8.2.4　钢的表面热处理

仅对工件表层进行热处理以改变其组织和性能的工艺称为表面热处理。有些零件（如凸轮、曲轴、齿轮等）在工作时，既承受冲击，表面又受摩擦，故在使用时对表面和心部的性能要求不同，如有些齿轮要求表面高硬度、高耐磨性，而心部要求高的综合力学性能。对于这种表里性能要求不同的零件，常采用表面热处理来强化钢件的表面性能。常用的表面热处理方法有表面淬火和表面化学热处理等。

1. 表面淬火

表面淬火是仅对工件表面进行的淬火工艺，即采用快速加热，使钢件表面迅速达到淬火时要求的加热温度，在热量传递还未使心部钢材达到临界点温度时就快速冷却的淬火工艺。表面淬火后使零件表面获得高的硬度，而心部仍保持原来的性能。

表面淬火主要适用于中碳钢和中碳合金钢。通常零件表面淬火前先进行正火或调质热处理，表面淬火后还需进行低温回火。如 45 钢经表面淬火和低温回火后，工件表面硬度可达 50～55HRC，具有较好的耐磨性，心部具有良好的塑性和韧性。

常用的表面淬火方法有感应淬火和火焰淬火等，其中以感应淬火应用较广。

（1）火焰淬火　是利用氧乙炔（或其他可燃气）焰使工件表层加热并快速冷却的淬火。适用于单件和小批量生产及大型工件的热处理，如大齿轮、齿条和钢轨面等。

（2）感应淬火　是利用感应电流通过工件所产生的热量，使工件表面、局部或整体加热并快速冷却的淬火。其基本原理（图 8-3）是将高频电流通过感应器（感应圈）产生的高频交变磁场，使工件在磁场中产生同频率的感应电流（即涡流），涡流主要集中在表层，这种现象称为趋肤效应。电流频率越高，电流集中的表层越薄。利用涡流所产生的热量几秒钟就能将工件表层加热到淬火温度，而心部温度却较低，然后立即喷水，在工件表面上形成淬火层。感应淬火生产效率高，淬火层得到高硬度的细小马氏体组织。感应淬火具有工件变形小、裂纹倾向小等特点，常用于主轴、齿轮等零件。

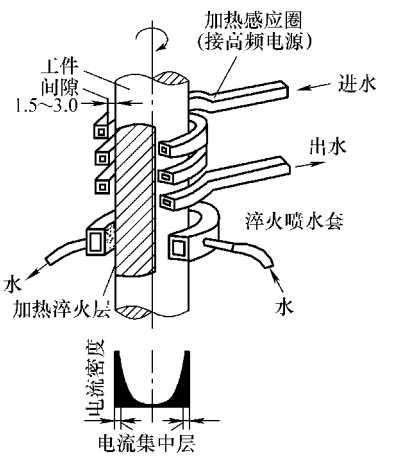


图 8-3　感应淬火示意图

根据所用电流频率不同，感应热可分高频（200～300kHz）加热、超音频（20～40kHz）加热、工频（50Hz）加热等。

2. 化学热处理

化学热处理是将工件置于适当的活性介质中加热、保温，使一种或几种元素渗

入它的表层，以改变其化学成分、组织和性能的热处理。其特点是表层不仅有组织改变也有化学成分的改变。按钢件表面渗入的元素不同，化学热处理可分为渗碳、渗氮（氮化）、碳氮共渗、渗硼、渗硅、渗铬等。

化学热处理的基本工艺过程可分三个基本步骤。

1）分解：渗入的介质在高温下分解出渗入元素的活性原子。

2）吸收：活性原子被钢表面吸收。

3）扩散：被吸收的活性原子由钢件表面向内扩散。

现将生产中常用两种化学热处理分别简要介绍如下：

（1）钢的渗碳 为了增加钢件表层的含碳量和一定的碳浓度梯度。将钢件在渗碳介质中加热并保温，使碳原子渗入表面层的化学热处理工艺称为渗碳。渗碳的主要目的是提高钢件表层的含碳量和一定的碳浓度梯度。然后经淬火和低温回火，使工件的表面层获得高硬度、高耐磨性。而工件内部仍具有原低碳钢的高塑性和高韧性。

进行渗碳热处理的钢常为低碳钢或低碳合金钢，如20Cr、20CrMnTi钢等。渗碳热处理时的加热温度为900～950℃。保温时间越长，则渗碳层厚度越厚。渗碳后钢件表面层的含碳最可达0.8%～1.0%，故经淬火后表面硬度可达60HRC以上。

渗碳热处理适用于表面要求高硬度、高耐磨性，而心部要求高韧性的零件。如表面易磨损且承受较大冲击载荷的齿轮轴、齿轮、活塞销、凸轮等。

热处理生产中常用气体渗碳法。气体渗碳法（图8-4）是将工件放在密封的加热炉（如井式气体渗碳炉）中，通入渗碳剂（如煤油、煤气、甲烷等），加热至920～930℃，炉内形成高浓度碳的气氛，在长时间保温的过程中，活性炭原子被钢件表面吸收，溶入高温奥氏体中，并随保温时间的增长，碳原子逐渐向内部扩散，形成一定深度的渗碳层。渗碳工件通常选用低碳钢和低碳合金钢材料，渗碳工件表层含碳量一般为0.85%～1.05%，经淬火、低温回火后工件表面硬度可达56～64HRC。

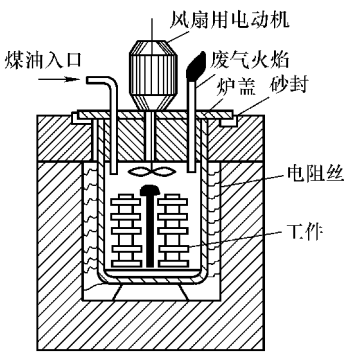


图8-4 气体渗碳法示意图

（2）渗氮（氮化） 在一定温度下于一定的介质中使活性氮原子渗入钢件表面的化学热处理工艺称为渗氮。

渗氮后在工件表面形成硬度很高的氮化物薄层。渗氮的主要目的是提高零件表面的硬度、耐磨性、耐蚀性及疲劳强度。工件必须采用渗氮钢，渗氮常为最后一道工序，渗氮时的加热温度低，故工件的变形较小。渗氮层具有良好的耐磨性和耐蚀性。渗氮常用于要求高硬度、高精度受冲击力不大的耐磨件。如精密机床主轴、镗床镗杆、精密丝杠、排气阀、高速精密齿轮、高压阀门、阀杆等。

8.2.5 其他热处理工艺

（1）可控气氛热处理 是为无氧化、无脱碳或按要求增碳，在成分可控的炉

气中进行的热处理。这种热处理可以防止氧化、脱碳，提高工件质量，能控制渗碳层的碳浓度。此种方法可进行工件的渗碳、碳氮共渗及脱碳工件的复碳等。

（2）形变热处理　是将塑性变形和热处理结合，以提高工件力学性能的复合工艺。它是提高钢的强度、韧性的有效工艺。例如：锻造零件加热到奥氏体区，保温一定时间后，进行锻造成型，当达到终锻温度时（必须是淬火温度），然后立即淬火与回火。与普通淬火相比，形变热处理后，钢的抗拉强度提高 10% ~30%，塑性提高 40% ~50%。

（3）真空热处理　是指在低于 1×10^5Pa（通常是 10^{-3} ~10^{-1}Pa）的环境中加热的热处理工艺。在真空加热时，工件不会产生氧化、脱碳现象，工件的表面质量和疲劳强度将得到提高。

（4）高能束热处理　利用激光、电子束、等离子弧、感应涡流或火焰等高功率密度能源加热工件的热处理工艺的总称。

激光热处理是以高能量激光作为能源以极快速度加热工件并自冷强化的热处理工艺。目前多采用较大的 CO_2 激光发生器，它的能量密度高，热量高度集中。其特点是加热区域小，加热速度快（百分之几秒）；不需要淬火冷却介质，利用工件本身迅速散热，达到自行淬火目的；晶粒细小、工件变形较小。适用于精密零件和关键零件的局部表面淬火。

电子束淬火是以电子束作为热源以极快速度加热工件并自冷强化的热处理工艺。其能量大大高于激光热处理。

8.3　铸铁

8.3.1　简介

铸铁是一系列主要由铁、碳和硅组成的合金的总称。铸铁的应用很广，据统计，汽车、拖拉机中铸铁零件约占重量的 50% ~70%，机床中约占重量的 60% ~90%，许多形状复杂或受压力及摩擦作用的零件，大多用铸铁制造。工业生产中常用的铸铁含有 C、Si、Mn、S、P 等元素。有时为了满足使用性能，还可以加入一定量的其他合金元素，得到合金铸铁。

1. 铸铁的特性

铸铁具有优良的工艺性能和特殊性能：优良的铸造性；良好的切削加工性；较好的耐磨性和减振性；低的缺口敏感性；熔炼工艺和设备简单，成本低廉；经合金化后具有良好的耐热性和耐蚀性等。但是，铸铁还存在着塑性、韧性较差，一般的铸铁抗拉强度较低等缺点。因此，铸铁一般用于制造形状复杂的不能用锻造、轧制、拉丝等方法成形的零件。

2. 碳在铸铁中的存在形式与石墨的形态

（1）碳在铸铁中存在形式 碳在铸铁中除极少量溶于铁素体之外，以两种形式存在：游离状态——石墨；碳化物状态——渗碳体及合金铸铁中的其他碳化物。

石墨是碳的一种同素异构体，具有简单六方晶格，面向距离较大，结合力较弱，故结晶形态常发展成为片状，且抗拉强度、塑性和韧性极低，几乎等于零。由于石墨的存在使铸铁具有许多优良特性。

（2）石墨在铸铁中存在形态 铸铁的性能不仅取决于碳的存在形式，还与石墨的形态有密切关系。常见的石墨形态有片状、团絮状、蠕虫状、球状等。铸铁的性能还与石墨的相对量、分布状态等有关。

常用的灰铸铁，其碳大部分以片状石墨存在，应用最广泛。而白口铸铁，其绝大部分碳以渗碳体存在，其性能硬而脆，难以进行切削加工，一般只做耐磨件，工业上直接应用极少。

总之，铸铁的力学性能主要取决于碳的存在形式和石墨的形态，以及石墨的相对含量和分布状态等。

8.3.2 铸铁的分类

根据碳在铸铁中存在的形式和石墨的形态不同，可分为下列几种：

1）白口铸铁：碳主要以游离碳化物形式析出的铸铁，断口呈白色。

2）灰铸铁：碳主要以片状石墨形态存在的铸铁，断口呈灰色。

3）可锻铸铁（马铁）：碳主要以团絮状石墨形态存在的铸铁。

4）蠕墨铸铁：碳主要以蠕虫状石墨形态存在的铸铁。

5）球墨铸铁：碳主要以球状石墨形态存在的铸铁。

6）合金铸铁：加入一定量的合金元素的铸铁，具有特殊的物理、化学性能。

白口铸铁断面呈银白色，故得此称。其性能特征为硬而脆，难以进行切削加工。除了少数要求高硬度和高耐磨性的零件（如球磨机中的内衬和磨球等），一般不用于制造机械零件。

8.3.3 灰铸铁

灰铸铁是工业常用铸铁中价格最低和应用最广泛的一种铸铁。在汽车、拖拉机、机床、起重装卸机械、内燃机机车等设备中大量采用。

1. 灰铸铁的成分与性能

常用灰铸铁的化学成分：$w(C)=2.8\%\sim4.0\%$，$w(Si)=1.0\%\sim3.0\%$，$w(Mn)=0.6\%\sim1.3\%$，$w(S)<0.15\%$，$w(P)<0.4\%$。

由于灰铸铁的化学成分和组织，决定了它的力学性能（抗拉强度、塑性和韧性）不如钢，但它具有以下优良性能：

（1）良好的铸造性 由于灰铸铁的含碳量接近共晶成分，所以熔点低、流动

性好、收缩率小（因石墨的密度小和比体积大而减少了灰铸铁凝固时的收缩量）。可以铸出形状复杂和薄壁铸件。

（2）良好的切削加工性　由于石墨起减摩和断屑作用，使刀具磨损小，易切削。

（3）良好的减摩性　在摩擦面上石墨脱落后能形成许多小孔，小孔可吸附储存润滑油，从而保持良好的减摩条件，脱离的石墨还有润滑作用。因此，减摩耐磨性好。

（4）优良的减振性　由于石墨的存在，割裂了基体，减弱了振动能量的传递，起到了减振的作用。灰铸铁减振能力约是钢的 10 倍，这也是铸铁优于钢的显著特点。因此，铸铁常用来制作减振性的零件，如机床底座等。

（5）较低的缺口敏感性　由于石墨的存在，相当于在基体上有许多小缺口，因此，对铸铁表面的缺陷和缺口几乎不具有敏感性。有一定的抗压、抗弯强度，而且价格便宜。

应当指出，铸铁中的石墨对受压应力的作用影响不大，铸铁的抗压强度和硬度与基体相应的钢接近。灰铸铁的力学性能除主要决定于基体组织外，还与石墨的形态、数量、大小和分布有关。例如：灰铸铁的抗拉强度、塑性和韧性不如可锻铸铁、蠕墨铸铁和球墨铸铁。

2. 常用灰铸铁的牌号及用途

灰铸铁牌号用 HT 和三位数字表示。其中：HT 表示灰铸铁，三位数字表示最低抗拉强度。例如：HT150 表示灰铸铁的最低抗拉强度为 150MPa。

灰铸铁具有一定的强度，还具有优良的工艺性能和特殊性能，而且价格低。因此，工业上应用广泛。常用来制造强度、韧性要求不太高以及要求有较好的减振性、耐磨性的零件，例如气缸体、活塞及各种机器底座等。

灰铸铁的类别、牌号、性能及用途见表 8-1。

表 8-1　灰铸铁的类别、牌号、性能及用途

铸铁类别	牌号	铸件壁厚/mm	力学性能		用途
			σ_b/MPa（≥）	HBW	
铁素体灰铸铁	HT100	2.5～10 10～20 20～30 30～50	130 100 90 80	110～166 93～140 87～131 82～122	适用于载荷小，对摩擦和磨损无特殊要求的不重要零件，如外罩、盖、油底壳、手轮、支架、重锤等
铁素体—珠光体灰铸铁	HT150	2.5～10 10～20 20～30 30～50	175 145 130 120	137～205 119～179 110～166 105～157	承受中等载荷的零件，如机座、支架、箱体、刀架、床身、轴承座、工作台、阀体等

（续）

铸铁类别	牌号	铸件壁厚/mm	力学性能		用途
			σ_b/MPa（≥）	HBW	
珠光体灰铸铁	HT200	2.5～10	220	157～236	承受较大载荷和要求一定的气密性或耐蚀性等较重要零件，如气缸、齿轮、机座、飞轮、床身、气缸套、缸套、机车车辆制动缸及其前后缸盖、活塞、齿轮箱、中等压力阀体等
		10～20	195	148～222	
		20～30	170	134～200	
		30～50	160	129～192	
	HT250	4.0～10	270	175～262	
		10～20	240	164～247	
		20～30	220	157～236	
		30～50	200	150～225	
孕育铸铁	HT300	10～20	290	182～272	承受高载荷，耐磨和高气密性重要零件，如机床的床身、机座、机架、高压液压件、活塞环、受力较大的齿轮、凸轮、衬套、大型发动机的曲轴、气缸体、缸套、气缸盖等
		20～30	250	168～251	
		30～60	230	161～241	
	HT350	10～20	340	199～293	
		20～30	290	182～272	
		30～50	260	171～257	

3. 灰铸铁的常用热处理

灰铸铁通过热处理只能改变基体组织，而不能改变石墨的形态。因此，灰铸铁常用的热处理工艺方法有以下三种：

（1）去应力退火　铸件冷却过程中，由于各部分冷却速度不同常会产生不同程度的内应力。为消除内应力通常将铸件缓慢加热到500～620℃，保温一定时间，然后随炉冷却至200℃左右出炉空冷。

（2）软化退火　当铸件出现白口，不易切削加工时，可将铸件加热到850～900℃，保温一定时间，使渗碳体分解，然后随炉冷却至400～500℃，出炉空冷。最后基体为铁素体或铁素体＋珠光体，从而消除了白口。

（3）表面淬火　为提高铸件表面硬度和耐磨性，可进行表面淬火。表面淬火可用火焰淬火、高频感应淬火等方法。

8.3.4　其他常用铸铁

灰铸铁经热处理可改变基体组织，经变质处理可细化石墨片，但均未能改变石墨的形态，对其性能提高并不显著。而改变石墨形态才能显著提高铸铁力学性能，例如可锻铸铁是团絮状石墨，蠕墨铸铁是蠕虫状石墨，球墨铸铁是球状石墨等，使各种铸铁具有不同的性能。

1. 可锻铸铁（又称马铁）

可锻铸铁是指将白口铸铁通过石墨化或氧化脱碳退火处理，改变其金相组织或

成分而获得的有较高韧性的铸铁。

（1）可锻铸铁的生产过程　生产可锻铸铁，应先采用碳、硅含量较低的铸铁铸造出白口铸铁件，而后再进行可锻化退火。即将白口铸铁件加热至 900 ~ 980℃，经长时间保温，使部分渗碳体分解成团絮状石墨。而后在缓慢冷却的过程中，奥氏体将析出二次石墨，聚集在团絮状石墨的表面。在共析温度时，若保温时间长或冷却极缓慢，获得铁素体可锻铸铁件（即墨心可锻铸铁），若冷速较快，石墨化被抑制，获得珠光体可锻铸铁件。

（2）可锻铸铁的组织、性能特点、应用及牌号　可锻铸铁的组织特征是在基体上分布着团絮状石墨。由于团絮状石墨对基体割裂作用较小，且其含碳、硅量低，因此，这种铸铁的抗拉强度、塑性、韧性比灰铸铁好。耐磨性、消振性优于普通碳钢。铸造性能则不及灰铸铁。切削加工性优于钢而接近灰铸铁。适用于大量生产的一些形状复杂而减振及强度要求较高的薄壁中小件，如汽车、拖拉机的前后轮壳、差速器壳、万向节壳、船用电动机壳等；以及管接头、低压阀门等。

可锻铸铁的牌号用 KTH 和 KTZ 及两组数字表示。其中 KTH 表示黑心可锻铸铁，KTZ 表示珠光体可锻铸铁；第一组数字表示最低抗拉强度，第二组数字表示最低伸长率。例如：KTZ450 – 06 表示珠光体可锻铸铁，最低抗拉强度为 450MPa，最低伸长率为 6% 。

常见可锻铸铁的牌号及用途见表 8-2。

表 8-2　常见可锻铸铁的牌号及用途

类别	牌　号	用　　途
黑心可锻铸铁	KTH300 – 06 KTH330 – 08 KTH350 – 10 KTH370 – 12	汽车、拖拉机、装卸机械零件，如后桥壳、转向机构壳体、车辆转向架上下旁撑与折角塞门、钩形扳手、弯头、三通等管件，中压阀门等
珠光体可锻铸铁	KTZ450 – 06 KTZ550 – 04 KTZ650 – 02 KTZ700 – 02	曲轴、凸轮轴、连杆、齿轮、万向接头、传动链轮等

2. 球墨铸铁

球墨铸铁是将铁液经过球化处理，而不是在凝固后经过热处理，使石墨大部分或全部呈球状，有时少量为团絮状的铸铁。

球墨铸铁的生产是将铁液在浇注前，加入一定量的球化剂（稀土镁合金等）和孕育剂（硅铁或硅钙合金），铸件凝固后可获得球状石墨的铸件。

（1）球墨铸铁的性能　球墨铸铁由于石墨呈球状，对基体组织割裂的作用和应力集中的作用更小（因球状的表面积最小）。因此，改变了灰铸铁抗拉强度极低的弱点，使它具有比灰铸铁更高的强度、塑性和韧性，尤其是屈强比（σ_b/σ_s =

0.7～0.8）比碳钢还高，球墨铸铁的力学性能接近于非合金钢，而且还具有一般铸铁的特性。球墨铸铁可以通过热处理而获得很高的强度，同时保持了良好的铸造工艺性、消振性和耐磨性。

（2）球墨铸铁的牌号及用途　球墨铸铁的牌号用 QT 和两组数字表示。其中 QT 表示球墨铸铁，第一组数字表示最低抗拉强度，第二组数字表示最小伸长率。例如 QT450－10 表示球墨铸铁，最低抗拉强度为 450MPa，最低伸长率为 10%。

由于球墨铸铁具有优良的性能，因而在生产中得到广泛应用。主要用来制造性能要求较高的铸件，有时还可代替非合金钢或低合金钢来制造某些负荷较大、受力较复杂的重要铸、锻件。如大功率柴油机的曲轴、气缸套、活塞、齿轮、连杆、中压阀门、汽车后桥等。

球墨铸铁的牌号、特点及用途见表 8-3。

表 8-3　球墨铸铁的牌号、特点及用途

牌号	特　点	用　途
QT400－18	焊接性及切削加工性能好，韧性高，脆性转变温度低	制造壳体与阀门零件，如汽车和拖拉机的轮毂、驱动桥壳体、离合器壳，机车车辆的阀体、阀盖，压缩机上高低气缸、钢轨垫板、电动机机壳、齿轮箱、飞轮壳等
QT450－15	同上，但塑性略低而强度与小能量冲击力较高	
QT450－10		
QT500－7	中等强度、塑性，切削加工性尚好	内燃机的机油泵齿轮、汽轮机中温气缸隔板、铁路机车车辆轴瓦、机器架、传动轴、飞轮、电动机架等
QT600－3	中高强度，低塑性，耐磨性较好	内燃机车、柴油机和汽油机的曲轴，部分轻型柴油机和汽油机的凸轮轴、气缸套、连杆、进排气门座等轻负荷齿轮；空压机、冷冻机、制氧机和泵的曲轴、缸体、缸套；球磨机齿轴、矿车轮、桥式起重机大小滚轮，小型水轮机主轴等
QT700－2	有较高的强度和耐磨性，塑性及韧性较低	
QT800－2		
QT900－2	有高的强度和耐磨性。较高的弯曲疲劳强度，接触疲劳强度和一定的韧性	汽车上的弧齿锥齿轮、万向节、传动轴；拖拉机上的减速齿轮；内燃机曲轴、凸轮轴

（3）球墨铸铁的热处理　球墨铸铁的热处理原理与钢相似，主要是改变其基体组织。根据球墨铸铁铸件的技术要求不同，常用的热处理方法有：退火（去应力退火）、时效处理（软化退火）、正火、调质处理、等温淬火等。

3. 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是金相组织中石墨形态主要为蠕虫状的铸铁。蠕墨铸铁的生产过程是用高碳、低硫、低磷的铁液加入蠕化剂（镁铁合金、镁钙合金等），经蠕化处理后获得蠕虫状石墨的高强度铸铁。由于它的石墨形态呈短小蠕虫状，所以它的性能介乎灰铸铁和球墨铸铁之间。

蠕墨铸铁的大致化学成分，一般属于高碳高硅的共晶或过共晶成分。按基体组织不同有三种类型：铁素体 + 蠕虫状石墨；（铁素体 – 珠光体）+ 蠕虫状石墨；珠光体 + 蠕虫状石墨。

蠕虫状石墨比片状石墨对基体产生的应力集中与割裂现象明显减小。因此，蠕墨铸铁的力学性能优于基体相同的灰铸铁而低于球墨铸铁。但蠕墨铸铁在铸造性能及导热性能等方面要比球墨铸铁好。

蠕墨铸铁的牌号用 RuT 和数字表示。其中 RuT 表示蠕墨铸铁，数字表示最低抗拉强度。例如：RuT340 表示蠕墨铸铁，最低抗拉强度为 340MPa。

常用蠕墨铸铁的牌号、特性及用途见表 8-4。

表 8-4　蠕墨铸铁的牌号、特性及用途

牌　号	特　性	用　途
RuT420 RuT380	高的强度、硬度和耐磨性，较高的热导率，适合于制造要求强度或耐磨性高的零件	活塞环、制动盘、钢球研盘等
RuT340	较高的强度、硬度，较好的耐磨性，适合制造要求较高强度、刚度及耐磨的零件	重型机床件，大型齿轮箱体、盖、座、飞轮起重机卷筒等
RuT260	强度一般，硬度较低，塑性韧性和热导率较高，一般需经退火，用于承受冲击和热疲劳的零件	增压器废气进气缸体、汽车底盘零件等

4. 合金铸铁

合金铸铁是常规元素硅、锰高于普通铸铁规定含量或含有其他合金元素，具有较高力学性能或某些特殊性能的铸铁。合金铸铁的生产是在铸铁中有意加入一定数量的合金元素或经某种处理后，具有特殊性能的铸铁。用于制造在腐蚀介质中、高温条件下或剧烈摩擦磨损等场合工作的零件。与在相似条件下使用的合金钢相比，具有熔铸简便、成本低廉、有良好使用性能的特点。其缺点是力学性能比合金钢低，脆性较大，较易碎裂。如能采取相应的设计与工艺措施，可以克服其缺点，在一定条件下满足使用要求。

常见几种合金铸铁简述如下：

（1）耐磨铸铁　不易磨损的铸铁。主要通过激冷或加入合金元素在铸铁中形成耐磨损的基体组织和一定数量的硬化相。常用耐磨铸铁有以下两种。

1）耐磨灰铸铁：在灰铸铁中加入铬、钼、铜等少量合金元素，提高灰铸铁耐磨性。主要用于制造机床导轨、内燃机缸套、活塞环等。

2）冷硬铸铁：用激冷的方法使激冷区内的碳全部或大部呈化合碳的铸铁。通

过激冷处理使铸件表面形成一层白口，使表层获得高硬度和高耐磨性。主要用于制造轧辊、车轮、凸轮轴等。

（2）耐热铸铁　可在高温使用，其抗氧化或抗生长性能符合使用要求的铸铁。如铝铸铁、高铬铸铁、镍铸铁、中硅铸铁等。在铸铁中加入大量的铝、硅、铬等合金元素，会使铸件表面形成一层致密的氧化膜，以此提高铸铁耐热性。主要用于制造炉底、换热器、坩埚、热处理炉内的运输链条等。

（3）耐蚀铸铁　有一定抗酸蚀能力的铸铁。加高硅耐蚀铸铁是在铸铁中加入铝、硅、铬、镍、铜等合金元素，能在铸铁表面形成一层连续致密的保护膜，并提高基体组织的电位，可有效地提高铸铁的抗蚀能力。主要用于制造在腐蚀介质中工作的零件，如化工设备的管道、阀门、泵体等。

8.4　钢

钢是指含碳量在 2% 以下，并含有少量其他元素（Si、Mn、S、P、O、N 等）的铁碳合金。

钢的种类繁多，按用途可分为：结构钢、工具钢、特殊钢。

8.4.1　钢的分类与牌号

钢的种类繁多，根据不同需要，可采用不同的分类方法。同一种钢材，采用不同的分类方法，可有不同的名称。有时用几种不同的分类方法综合命名。

GB/T 13304.1—2008《钢分类　第 1 部分　按化学成分分类》和 GB/T 13304.2—2008《钢分类　第 2 部分：按主要质量等级和主要性能或使用特性的分类》系列标准是结合我国国情，参照国际标准 ISO 4948.1《钢分类　第 1 部分：按化学成分分为非合金钢和合金钢》和 ISO 4948.2《钢分类　第 2 部分：非合金钢和合金钢按主要质量等级、主要性能及使用特性的分类》而制定的新国家标准，于 2009 年 4 月 1 日实施。

1. 钢的分类

（1）按化学成分　根据各种合金元素规定含量界限值，将钢分为非合金钢、低合金钢和合金钢三大类。

（2）按主要质量等级、性能及使用特性分类

1）按主要质量等级可分为普通质量、优质和特殊质量。其中合金钢只有优质和特殊质量两种。

2）按主要性能及使用特性分类：非合金钢、低合金钢和合金钢中的每类都有多种分类方法，每种钢也都有相应的名称。例如冷成形用薄钢板、结构钢、工具

钢、不锈钢及钢轨用钢等。合金钢按主要质量等级和主要使用特性划分了各钢类系列。

根据国家标准，将钢的分类总结归纳如下：

非合金钢

普通质量非合金钢

碳素结构钢、碳素钢筋钢、一般钢板桩型钢等。

优质非合金钢

机械结构用优质碳素钢、工程结构用碳素钢、冲压薄板用低碳结构钢、镀层板带用碳素钢、锅炉和压力容器用碳素钢、造船用碳素钢、铁道用碳素钢、焊条用碳素钢、标准件用钢、冷锻铆螺用钢、非合金易切削钢、电工用非合金钢、优质碳素铸钢等。

特殊质量非合金钢

保证淬透性非合金钢、保证厚度方向性能非合金钢、航空兵器等用非合金结构钢、核能用非合金钢、特殊焊条用非合金钢、碳素弹簧钢、特殊盘条钢丝、特殊易切削钢、碳素工具钢、电磁纯铁、原料纯铁等低合金钢

普通质量低合金钢

一般低合金高强度结构钢、低合金钢筋钢、矿用一般低合金钢等。

优质低合金钢

通用低合金高强度结构钢、锅炉和压力容器用低合金钢、造船用低合金钢、汽车用低合金钢、桥梁用低合金钢、自行车用低合金钢、低合金耐候钢、铁道用低合金钢、矿用优质低合金钢、输油管线用低合金钢等。

特殊质量低合金钢

核能用低合金钢、保证厚度方向性能低合金钢、铁道用特殊低合金钢、低温压力容器用钢、舰船及兵器等专用低合金钢等。

合金钢

优质合金钢

一般工程结构用合金钢、合金钢筋钢、电工用硅钢、地质用合金钢、石油钻探用合金钢、耐磨钢、硅锰弹簧钢等。

特殊质量合金钢

压力容器用合金钢、经热处理的合金结构钢、经热处理的地质石油钻探用合金钢管、合金结构钢（调质、渗碳钢、氮化钢、冷塑性成型用钢）、合金弹簧钢、不锈钢、耐热钢、合金工具钢（量具刃具用钢、耐冲击工具用钢、热作模具钢、冷作模具钢、塑料模具钢）、高速工具钢、轴承钢、高电阻电热钢、无磁钢、永磁钢、软磁钢等

2. 工业用钢的牌号表示方法

我国《钢铁产品牌号表示方法》（GB/T 221—2008）的规定，一般采用汉语拼音字母、化学元素符号和阿拉伯数字相结合的方法表示。

采用汉语拼音字母表示产品名称、用途、特性和工艺方法时，一般从代表产品名称的汉字的汉语拼音中选取第一个字母。当和另一产品所取字母重复时，改取第二个字母或第三个字母，或同时选取两个汉字的第一个拼音字母。

各类钢的牌号表示方法，将在讨论钢的具体品种时作具体介绍。

8.4.2　非合金钢

1. 碳素结构钢

碳素结构钢是建筑及工程用非合金结构钢，用于制造一般结构件及普通机械零件。其特点是：含碳量一般属于低、中碳钢；工艺性能（焊接性、冷成形性）优良；通常热轧成扁平成品或各种型材（圆钢、方钢、工字钢、钢筋等），一般不经过热处理，在热轧态直接使用；冶炼简单、价格低廉。

碳素结构牌号的表示方法如下：

碳素结构钢采用代表屈服强度的汉语拼音字母“Q”，屈服强度数值（单位为 MPa），质量等级（A、B、C、D、E），脱氧方法（F、b、Z 和 TZ，其中 Z 和 TZ 可省略）等符号表示，按顺序组成牌号。例如：Q235AF 表示屈服强度 $\sigma_S \geqslant$ 235MPa，质量为 A 级的沸腾碳素结构钢。

碳素结构钢的性能特点和用途举例见表 8-5。

表 8-5　碳素结构钢的性能特点和用途

种类	性能特点	用　途
Q195	具有较高的塑性和韧性，易于冷加工	制造载荷小的零件。如垫圈、铆钉、地脚螺栓、开口销、拉杆、冲压零件及焊接件
Q215	具有较高的塑性和韧性，易于冷加工	制造薄钢板、低碳钢丝、焊接钢管、螺钉、钢丝网、屋面板、铆钉、垫圈、犁板等
Q235A Q235B	强度、塑性、韧性以及焊接性等方面都较好，可满足钢结构的要求，应用广泛	制造各种薄钢板、钢筋、型条钢、中厚板、铆钉以及机械零件，如拉杆、齿轮、螺栓、钩子、套环、轴、连杆、销钉、心部要求不高的渗碳件、焊接件等。Q235C 级与 D 级则作为重要的焊接结构件

（续）

种类	性能特点	用　途
Q255A Q255B	含碳量较高，强度和屈服强度也较高，塑性及焊接性较好，应用不如 Q235 广泛	制造钢结构的各种型条钢、钢板以及各种机械零件，如轴、拉杆、吊钩、摇杆、螺栓、键和其他强度要求较高的零件
Q275	强度、屈服强度较高，塑性和焊接性较差	钢筋混凝土结构配件、构件、农机用型钢、螺栓、连杆、吊钩、工具、轴、齿轮、键以及其他强度要求较高的零件

2. 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢是用来制造较为重要机械零件的非合金钢。其特点是：w(C)<0.8%；化学成分准确、力学性能可靠；硫、磷等有害杂质元素含量较少，钢的质量较高；一般机械零件都进行热处理，以充分发挥其力学性能潜力。

优质碳素结构钢采用阿拉伯数字和化学元素符号及代表产品名称、用途、特性和工艺方法的符号表示。以二位阿拉伯数字表示平均含碳量（以万分之几计）。若钢为较高含锰量时，在数字后加锰元素符号。例如：平均含碳量为 0.45% 的优质碳素结构钢（镇静钢），其牌号表示为 45；平均含碳量为 0.50%，含锰量为 0.70% ~1.00% 的优质碳素结构钢，其牌号表示为 50Mn。

优质碳素结构钢的特点和用途举例见表 8-6。

表 8-6　优质碳素结构钢的特点和用途

类别（牌号）	主 要 特 点	用途
低碳钢（08F）	塑性好，强度低	可制成薄板、深冲压制品、容器等
低碳钢（10 ~25）	良好的冲压和焊接性能	常用于受力不大，而塑性、韧性较高的零件。如焊接容器、螺钉、杆件、轴套等。经渗碳后，表面耐磨、心部有良好韧性，可制造摩擦片等
中碳钢（30 ~55、40Mn、50Mn）	经热处理后，具有良好的综合力学性能	制造齿轮、连杆、轴类零件
高碳钢（60 ~85、60Mn ~70Mn）	经热处理后，具有较高的耐磨性、弹性	制造弹簧、钢瓶、车轮、钢丝绳、农机耐磨件等

3. 碳素工具钢

碳素工具钢用来制造低速、手动刀具及常温下使用的工具、模具和量具等。其特点是：均属于高碳特殊质量的非合金钢；均需要热处理（淬火与回火）；有害杂质（S、P）元素含量较少，质量较高。

碳素工具钢的牌号是用“T”和阿拉伯数字表示，数字表示平均含碳量（以千分之几计）。高级优质碳素工具钢在牌号尾部加“A”，例如：平均含碳量为 1.0% 的高级优质碳素工具钢，其牌号表示为 T10A。

碳素工具钢的性能特点和用途见表 8-7。

表 8-7　碳素工具钢的性能特点和用途

牌号	特点	用途
T7	热处理后具有较高的强度和韧性，且有较高的硬度，但热硬性低，淬透性差，淬火变形大	制造能承受振动和撞击、要求较高韧性，但切削性能要求不太高的工具。如錾子、冲头、木工用锯和凿、刨等
T8	热处理后有较高的硬度和耐磨性，但热硬性较低，淬透性差，加热时容易过热，变形较大	制造不受大冲击、需要较高硬度和耐磨性的工具，如简单的模子和冲头、切削金属的刀具，木工用的铣刀和斧、錾子、圆锯片以及钳工工具
T8Mn	性能同上，但因加入了锰，淬透性较好，淬硬层较深	同 T8，但可制造截面较大的工具
T9	性能和 T8 近似，但因含碳量较高一些，故硬度和耐磨性较高，韧性较差一些	硬度较高、有一定韧性，但不受剧烈振动冲击的工具，如中心钻、冲模、木工切削工具及凿岩石錾子等
T10	淬火加热时不易过热，仍保持细晶粒，韧性尚可，强度及耐磨性均较 T7 ~ T9 高些，但热硬性低，淬透性仍然不高，淬火变形大	应用较广，适于制造切削条件较差，耐磨性要求较高，且不受突然和剧烈冲击振动而需要一定韧性及具有锋利刃口的各种工具，如车刀、刨刀、钻头、丝锥、扩孔刀具、板牙、手锯锯条等
T11	具有较好的综合力学性能，缺点同 T10	用途和 T10 基本相同，习惯上多采用 T10
T12	淬火后有较多的过剩碳化物，因此耐磨性和硬度高，但韧性较低，且热硬性低，淬透性差，淬火变形大	制造不受冲击载荷、切削速度不高而需要很高硬度和耐磨性的各种工具和耐磨机件，如铰刀、板牙、刮刀、量规、锉刀、锯片以及小截面尺寸的冷切边模和冲孔模等
T13	硬度极高，耐磨性最好，但因碳化物数量增多和分布不均匀，故力学性能较低，不能承受冲击，缺点同 T12	制造不受冲击振动而需极高硬度的各种工具。如剃刀、刮刀、刻字刀具、拉丝工具、岩石加工用工具及耐磨机械零件

4. 易切削结构钢

易切削结构钢是在钢中加入一种或几种元素，利用本身或与其他元素形成一种对切削加工有利的夹杂物，来改善钢材的切削加工性。易切削钢的牌号表示方法同优质碳素结构钢，但在牌号前冠以 Y。加钙、铅易切削钢在数字后加 Ca、Pb，例如：平均含碳量为 0.45%，含钙量为 0.002% ~0.006% 的易切削钢，其牌号表示为 Y45Ca。目前，使用的易切削结构钢有 Y12、Y12Pb、Y15、Y20、Y30、Y35、Y40Mn、Y45Ca 等。常用元素是硫、磷、铅，也使用钙、硒、碲等。Y12、Y15 是

硫、磷复合低碳易切削钢，用来制造螺栓、螺母、管接头等不重要的标准件；Y20 切削加工后可渗碳处理，用来制造表面耐磨的仪器、仪表零件；Y45Ca 钢适合于高速切削加工，比 45 钢生产效率提高一倍以上，用来制造重要的零件，如机床的齿轮轴、花键轴等热处理零件。

5. 工程用铸造碳钢

在工业生产中，会遇到许多形状复杂的零件，用锻造方法难以加工。而用铸铁件力学性能又达不到要求时，可用铸造碳钢生产。

铸造碳钢主要用于制造重型机械、矿山机械、冶金机械、机车车辆的某些零件和构件等。

一般工程用铸造碳钢的牌号及用途见表 8-8。

表 8-8　工程用铸造碳钢牌号及用途

牌号	特 性 及 用 途
ZG200 – 400	有良好的塑性、韧性和焊接性。用于受力不大、要求韧性较好的各种机械零件，如机座、变速箱壳等
ZG230 – 450	有一定的强度和较好的塑性、韧性，焊接性良好，切削加工性尚可，用于受力不大，要求韧性的各种机械零件，如机车车辆车钩和摇枕、砧座、外壳、轴承盖、底板、阀体、犁柱等
ZG270 – 500	有较高的强度和较好的塑性，铸造性能良好，焊接性尚好，切削加工性好。应用广泛，用作轧钢机架、轴承座、连杆、箱体、曲轴、缸体等
ZG310 – 570	有高的强度、硬度和耐磨性，切削加工性中等，焊接性较差，流动性好，裂纹敏感性较大。用作齿轮、棘轮等
ZG340 – 640	有高的强度、硬度和耐磨性，切削加工性中等，焊接性较差，流动性好，裂纹敏感性较大。用作齿轮、棘轮等

8.4.3　低合金钢

低合金钢是一类可焊接的低碳低合金工程结构用钢。工程结构件的特点是：尺寸大，需冷弯及焊接成形，长期暴露在低温或暴晒环境下，大多在热轧或正火条件下使用。因此这类钢材应具有：较高的强度与屈强比；较好的塑性与韧性；良好的焊接性；较低的缺口敏感性和冷弯后的时效敏感性；较低的脆性转变温度等性能。

1. 低合金高强度结构钢

低合金高强度结构钢以锰元素为主，还有钒、钛、铌、铝、铬、镍等元素。它与非合金钢相比具有较高的强度、韧性、耐蚀性及良好的焊接性，而且价格也与非合金钢相接近。因此，目前低合金高强度结构钢广泛用于制造桥梁、车辆、船舶、容器、建筑钢筋等。

按 GB/T 1591—2008 低合金高强度结构钢标准。低合金高强度结构钢的牌号表

示方法与碳素结构钢基本相同，即由代表屈服强度的汉语拼音字母“Q”，屈服强度数值（单位为 MPa），质量等级（A、B、C、D、E）等符号表示，按顺序组成牌号。例如 Q345C，表示屈服强度 $R_{eL}\geqslant 345MPa$，质量为 C 级的低合金高强度结构钢。低合金高强度结构钢的牌号及用途见表 8-9。

表 8-9 低合金高强度结构钢的牌号及用途

牌 号	用 途
Q295	车辆的冲压件、冷弯型钢、螺旋焊管、拖拉机轮圈、低压锅炉锅筒、中低压化工容器、输油管道、储油罐、油船等
Q345	船舶、铁路车辆、桥梁、管道、锅炉、压力容器、石油储罐、起重及矿山机械、电站设备、厂房钢架等
Q390	中高压锅炉锅筒、中高压石油化工容器、大型船舶、桥梁、车辆、起重机及其他较高载荷的焊接结构件等
Q420	大型船舶、桥梁、电站设备、起重机械、机车车辆、中压或高压锅炉、容器及其大型焊接结构件等
Q460	可淬火加回火后用于大型挖掘机、超重运输机械、钻井平台等

2. 低合金耐候钢

耐候钢是耐大气腐蚀的钢，是在低碳非合金钢的基础上加入少量铜、铬、镍、钼等合金元素，使其在金属表面形成一层保护膜。为了进一步改善性能，还可再添加微量的铌、钛、钒、锆等元素。我国目前使用的耐候钢分为焊接结构用耐候钢 GB/T 4172—2000 和高耐候性结构钢 GB/T 4171—2008 两大类。前一类（如 12MnCuCr）适用于桥梁、建筑及其他要求耐候性的结构件，后一类（如 09CuPCrNi－A）适用于机车车辆、建筑、塔架和其他要求高耐候性的钢结构。

耐候钢牌号的表示方法同合金结构钢。

高耐候结构钢的牌号及用途见表 8-10。

表 8-10 高耐候结构钢的牌号及用途

牌 号	用 途
09CuPCrNi－A	适用于车辆、建筑、塔架和其他结构用的高耐候性低合金结构钢。通常交货状态使用
09CuCrNi－B	
09CuP	

3. 低合金专业用钢

为了适应某些专业的特殊需要。对低合金高强度结构钢的成分、工艺及性能作相应的调整和补充规定，从而发展了门类众多的低合金专业用钢。例如锅炉、压力容器、船舶、桥梁、汽车、农机、铁道、自行车、矿山、建筑钢筋等，许多

已纳入国家标准。专用结构钢一般采用代表屈服强度的汉语拼音字母“Q”、屈服强度数值和代表产品用途的符号等表示，例如：压力容器用钢牌号表示为Q345R；锅炉用钢牌号表示为Q390g；桥梁用钢表示为Q420q等。仅举几例说明如下：

（1）汽车用低合金钢　主要用于制造汽车大梁、托架及车壳等结构件。如GB 3273规定的09MnREL、06TiL、08TiL、16MnL、16MnREL等汽车大梁用低合金钢板。

（2）低合金钢筋钢　主要用于建筑使用的钢筋结构。如GB 1499规定的20MnSi、20MnTi、20MnSiV、25MnSi等低合金钢筋钢。

（3）铁道用低合金钢　主要用于重轨、轻轨和异型钢。如GB 2585、GB 8603和GB 11264规定的U71Cu、U71Mn、U70MnSi、U71MnSiCu、45SiMnP、50SiMnP、09CuPRE、09V等铁道用低合金钢。

8.4.4　合金结构钢

机械结构用钢主要用于制造机械零件。在机械制造与维修等方面使用最广，其质量等级都属于特殊质量等级，大多须经热处理才能使用。按其用途及热处理特点不同可分为合金渗碳钢、合金调质钢、合金弹簧钢、滚动轴承钢和超高强度钢等。工程结构用钢主要用于制造工程结构件，其中有压力容器、钻探和耐磨件等。

合金结构钢牌号采用阿拉伯数字和合金元素符号表示。

用两位阿拉伯数字表示平均含碳量（以含碳量万分之几计），放在牌号头部。

合金元素含量表示方法为：平均含量小于1.5%时，牌号中只标明元素，一般不标明含量；平均合金含量为1.5%～2.49%、2.5%～3.49%、3.5%～4.49%时，在合金元素后相应写成2、3、4等。高级优质合金结构钢，在牌号后加符号“A”；特级优质合金结构钢，在牌号后加符号“T”。例如：平均含碳量为0.30%，含铬量为0.95%，含锰量为0.85%，含硅量为1.05%的高级优质合金结构钢，其牌号表示为30CrMnSiA。

1. 合金渗碳钢

合金渗碳钢是用来制造承受强烈冲击载荷和摩擦磨损的零件。这类钢属于低碳钢（碳含量为0.10%～0.25%），经渗碳后淬火（或渗碳后二次淬火）加低温回火，使零件表层获得高碳回火马氏体加碳化物，其硬度较高（58～64HRC），而零件心部保持高韧性，即具有“表硬心韧”的特点。

合金渗碳钢常用来制造承受高速、中等载荷、受强烈冲击及耐磨的较重要零件。如主动轴、高速齿轮等。常用的合金渗碳钢有20Cr、20CrMnTi、20CrMnMo等。目前常用20Mn2B或20MnVB钢代替20CrMnTi钢。

常用合金渗碳钢的牌号及用途见表8-11。

表 8-11　常用合金渗碳钢的牌号及用途

统一数字代号	牌号	用途
A20152	15Cr	截面不大、心部要求较高强度和韧性、表面承受磨损的零件，如齿轮、凸轮、活塞、活塞环、联轴器等
A20202	20Cr	截面在 30mm 以下、形状复杂、心部要求较高强度、表面承受磨损的零件，如机床变速箱齿轮、活塞销等
A01202	20MnV	锅炉、高压容器等较高载荷的焊接结构件，使用温度上限 450 ~ 475℃，也可用于冷拉、冲压零件，如活塞销、齿轮等
A00202	20Mn2	代替 20Cr 钢制作渗碳的小齿轮、小轴，低要求的活塞销、气门顶杆、变速杆等
A42202	20CrNi3	在高载荷条件下工作的齿轮、蜗杆、轴、螺杆、双头螺柱、销钉等
A26202	20CrMnTi	在汽车、拖拉机中用于截面在 30mm 以下，承受高速、中或重载荷以及受冲击、摩擦的重要渗碳件，如齿轮、轴、蜗杆等
A34202	20CrMnMo	拖拉机、电力机车主动齿轮、活塞球头销等
A73202	20MnVB	模数较大、载荷较重的中小渗碳件，如重型机床上的齿轮、轴，汽车后桥主动、从动齿轮等
A43202	20Cr2Ni4	大截面渗碳件如大型齿轮、轴等
A52183	18Cr2Ni4WA	大截面、高强度、良好韧性以及缺口敏感性低的重要渗碳件，如齿轮、传动轴、曲轴、花键轴、活塞销等

2. 合金调质钢、非调质钢和低碳马氏体钢

（1）合金调质钢　是用来制造重载荷、耐冲击和具有良好综合力学性能的重要零件。这类钢属于中碳钢（碳含量为 0.3% ~0.5%），具有良好的淬透性。调质后的零件还可以进行表面淬火和化学热处理，如表面淬火、软氮化等，以提高其疲劳强度和耐磨性。

合金调质钢多用来制造大、中截面承受交变载荷的零件，如内燃机的连杆、电力机车的从动传动齿圈、汽车的传动轴齿轮和传动轴、机床的主轴和蜗杆等零件。常用合金调质钢有 40Cr、42CrMo 等。常用合金调质钢的牌号及用途见表 8-12。

表 8-12　常用合金调质钢的牌号及用途

统一数字代号	牌　号	用　　途
A20402	40Cr	制造承受中等载荷和中等速度工作下的零件，如汽车后半轴及机床上齿轮、轴、花键轴、顶尖套等
A10422	42SiMn	在高频感应淬火及中温回火状态下制造中速、中等载荷的齿轮；调质后高频感应淬火及低温回火状态下制造表面要求高硬度、较高耐磨性、较大截面的零件，如主轴、齿轮等

（续）

统一数字代号	牌　号	用　　途
A71402	40MnB	代替 40Cr 钢制造中、小截面重要调质件，如汽车半轴、转向轴、蜗杆以及机床主轴、齿轮等
A73402	40MnVB	代替 40Cr 钢制造汽车、拖拉机和机床上的重要调质件，如轴、齿轮等
A30352	35CrMo	通常用作调质件，也可在高、中频感应淬火或淬火、低温回火后用于高载荷下工作的重要结构件，特别是受冲击、振动、弯曲、扭转载荷的机件，如主轴、大电机轴、曲轴、锤杆等
A22402	40CrMn	在高速、高载荷下工作的齿轮轴、齿轮、离合器等
A24302	30CrMnSi	重要用途的调质件，如高速高载荷的砂轮轴、齿轮、轴、螺母、螺栓、轴套等
A40402	40CrNi	制造截面较大、载荷较重的零件，如轴、连杆、齿轮轴等
A33382	38CrMoAl	高级渗氮钢，常用于制造磨床主轴、自动车床主轴、精密丝杠、精密齿轮、高压阀门、压缩机活塞杆、橡胶及塑料挤压机上的各种耐磨件
A34402	40CrMnMo	截面较大、要求高强度和高韧性的调质件，如 8t 货车的后桥半轴、齿轮轴、偏心轴、齿轮、连杆等
A50403	40CrNiMoA	要求韧性好、强度高及大尺寸的重要调质件，如重型机械中高载荷的轴类、直径大于 250mm 的汽轮机轴、叶片、曲轴等
A52253	25Cr2NiWA	200mm 以下要求淬透的零件

（2）非调质钢　是在中碳钢中添加微量合金元素（如 V、Ti、Nb、N 等），加热时这些元素固溶在奥氏体中，通过控温轧制（或锻造）、控温冷却，在铁素体和珠光体中弥散析出碳化物和氮化物为强化相，使钢在轧制（或锻造）后不经调质处理，即可获得碳素（或合金）结构钢经调质处理后所达到的力学性能。这类钢按使用加工方法不同分两类：

1）切削加工用非调质机械结构钢，牌号头部加 YF。

2）热锻用非调质机械结构钢，牌号头部加 F。

非调质钢是近年来为了节约能源，简化工艺，发展了不进行调质处理，而是通过锻造时控制终锻温度及锻后的冷却速度来获得及具有很高的强韧性能的钢材，如 YF35MnV 钢制造的汽车发动机连杆性能已达到或超过 55 钢连杆，而可加工性远远优于 55 钢。

（3）低碳马氏体钢　是低碳合金结构钢，经淬火与低温回火后具有良好的综合力学性能。例如用新研制的低碳马氏体 20SiMn2MoVA 钢制造零件（如石油钻机的吊环等）可节约重量 42%。汽车专用钢中，用铆螺钢 ML15MnVB 制造的连杆螺

栓、气缸盖螺栓、半轴螺栓，经淬火加低温回火后其性能优于 ML40Cr 钢调质后的螺栓。

3. 合金弹簧钢

合金弹簧钢是用来制造各种弹簧或减振元件的特殊质量合金结构钢。弹簧是用来缓和冲击或振动，以弹性变形贮存能量的零件。因此，弹簧钢必须具有高的弹性极限和屈强比，足够的塑性、韧性和疲劳强度，还要具有较高的淬透性。

弹簧钢的一般含碳量（0.45% ~0.7%）高于调质钢，其热处理一般是淬火加中温回火，获得回火托氏体组织。例如，60Si2Mn 所制弹簧经淬火后在 480℃回火，其 $\sigma_{0.2}$ = 1200MPa，R_{eL} = 1300MPa，$\sigma_{0.2}/R_m$ = 92%。常用的合金弹簧钢有 55Si2Mn、60Si2Mn 等钢，主要用来制造机车车辆、汽车、拖拉机的板弹簧和螺旋弹簧。

常用合金弹簧钢的牌号及用途见表 8-13。

表 8-13 常用合金弹簧钢的牌号及用途

牌号	用途
55Si2Mn	汽车、拖拉机、铁道车辆上的减震板簧和螺旋弹簧，气缸安全阀弹簧
55Si2MnB	与 55Si2Mn 相近，但淬透性、疲劳强度更高，适用于制造中、小型截面的钢板弹簧
60Si2Mn	与 55Si2Mn 相比，强度和弹性极限稍高，淬透性好，应用广泛，适用于制造铁道车辆、汽车、拖拉机上的减震板簧和螺旋弹簧，气缸安全阀弹簧还可用作 250℃以下使用的耐热弹簧
55SiMnVB	代替 60Si2Mn 钢制作重型、中、小型汽车的板簧和其他中型截面的板簧和螺旋弹簧
60Si2CrA	用作承受高应力及工作温度在 300 ~350℃以下的弹簧，如调速器弹簧、汽轮机汽封弹簧、破碎机用簧等
55CrMnA	车辆、拖拉机工业上制作载荷较重、应力较大的板簧和直径较大的螺旋弹簧
50CrVA	用作较大截面的高载荷重要弹簧及工作温度 <300℃的阀门弹簧、活塞弹簧、安全阀弹簧等
30W4Cr2VA	用作工作温度 <500℃的耐热弹簧，如锅炉主安全阀弹簧、汽轮机汽封弹簧等

4. 滚动轴承钢

滚动轴承钢主要用于制造滚动轴承的内、外套圈以及滚动体的特殊质量的合金结构钢。此外还可制造某些工具，例如模具、量具等。

滚动轴承在工作时承受峰值很高的交变接触压应力，同时滚动体与内、外套圈之间还产生强烈的摩擦，并受到冲击载荷作用、大气和润滑油介质的腐蚀作用。所以要求这类钢具有高而均匀的硬度和耐磨性、高的抗拉强度和接触疲劳强度、足够的韧性和对大气、润滑剂的耐蚀能力。

轴承钢分为高碳铬轴承钢、渗碳轴承钢、高碳铬不锈轴承钢和高温轴承钢等四大类。

高碳铬轴承钢，在牌号头部加符号“G”，但不标明含碳量。铬含量以千分之几计，其他合金元素按合金结构钢的合金含量表示。例如：平均含铬量为 1.50% 的轴承钢，其牌号表示为 GCr15。

渗碳轴承钢，采用合金结构钢的牌号表示方法，仅在牌号头部加符号“G”。例如：平均含碳量为 0.20%，含铬量为 0.35% ~0.65%，含镍量为 0.40% ~0.70%，含钼量为 0.10% ~0.35% 的渗碳轴承钢，其牌号表示为 G20CrNMo。

高碳铬不锈轴承钢和高温轴承钢，采用不锈钢和耐热钢的牌号表示方法，牌号头部不加符号“G”。例如：平均含碳量为 0.95%，含铬量为 18% 的高碳铬不锈轴承钢，其牌号表示为 95Cr18。

常用高碳铬轴承钢的牌号及用途见表 8-14。

表 8-14 常用高碳铬轴承钢的牌号及用途

牌号	用 途
GCr9	一般工作条件下小尺寸的滚动体和内、外套圈
GCr15	广泛用于汽车、拖拉机、内燃机、机床及其他工业设备上的轴承
GCr15SiMn	大型轴承或特大轴承（外径 >410mm），如机车车辆的滚动体和内外套圈

5. 超高强度钢

超高强度钢一般是指 $\sigma_b > 1500$MPa 或 $\sigma_s > 1380$MPa 的特殊质量合金结构钢。这类钢目前主要用于航空、航天工业。铁道运输行业的机车车辆的零部件制造也选用超高强度钢。这类钢主要特点是具有高的强度和足够的韧性，且比强度和疲劳极限高，在静载荷和动载荷的条件下，能承受很高的工作应力。

超高强度钢通常按化学成分和强韧化机制可分为低合金超高强度钢、二次硬化型超高强度钢和马氏体时效钢等类型。

（1）低合金超高强度钢 是在合金调质钢基础上加入一定量的某些合金元素的钢。其含碳量 <0.45%，以保证足够的塑性和冲击韧度。合金元素总含量为 5% 左右，其主要作用是提高淬透性、耐回火性及韧性。目前广泛用 30CrMnSiNi2A 低合金高强度钢，经热处理（淬火加低温回火）后，$\sigma_b = 1700 \sim 1800$MPa。

（2）二次硬化型钢 是含有强碳化物形成元素（其总含量为 5% ~10%），经淬火和三次高温回火（580 ~600℃）获得高强度、抗氧化性和热疲劳性的特殊质量合金结构钢。其典型牌号为 4Cr5MoSiV。

（3）马氏体时效钢 是含碳量极低（<0.03%），含镍量高（18% ~25%），并含有铜、钛、铌、铝等时效元素的特殊质量的合金结构钢。这类钢淬火后经时效（450 ~500℃）处理，其金相组织为低碳马氏体基体上弥散分布极细微的金属间化合物 Ni2Mo、Fe2Mo 等粒子。因此，马氏体时效钢具有高的强度、良好的塑性和韧性以及较高的断裂韧度，可以冷、热压力加工和焊接。典型的马氏体时效钢有 Ni25Ti2AlNb、Ni18Co9Mo5TiAl 等，时效处理后 $\sigma_b = 2000$MPa 左右。

6. 耐磨钢

铁路道岔、坦克履带、挖掘机铲齿等构件的共同特点是工作时其表面受到剧烈冲击、强摩擦、高压力。因此，这类零件制造用钢必须具有表面硬度高而耐磨、心部韧性好和强度高的特点。通常用高锰钢制造这类零件，其钢号为ZGMn13，其成分特点是高锰（11.5%～14.5%）和高碳（0.9%～1.3%），铸态组织是奥氏体和大量锰的碳化物，经固溶强化处理后可获得单相奥氏体组织。单相奥氏体组织韧性、塑性很好。开始投入使用时硬度很低、耐磨性差，当工作中受到强烈的挤压、撞击、摩擦时，钢件表面迅速产生强烈的加工硬化，同时伴随奥氏体向马氏体的转变以及碳化物沿滑移面析出，从而使钢件表面硬度提高到50HRC以上，获得耐磨层，而心部仍保持原来的组织和高韧性状态。

高锰钢不易切削加工，而铸造性能较好，故生产零件一般用铸造方法，而且必须经“水韧处理”（即为了改善某些奥氏体的组织以提高韧性，将钢件加热到高温使过剩相溶解，然后水冷的热处理工艺）。例如高锰钢（ZGMn13）加热温度1000～1100℃水韧后才能使用。

8.4.5 合金工具钢和高速工具钢

工具钢按化学成分可以分为非合金工具钢、合金工具钢和高速工具钢三大类。合金工具钢与非合金工具钢相比，主要是加入合金元素提高了钢的淬透性、耐回火性和韧性。但有时也会带来不利影响，如脱碳敏感性、回火脆性以及降低切削加工性。

1. 合金工具钢

合金工具钢按用途分类，有量具刃具钢、耐冲击工具钢、冷作模具钢、热作模具钢、无磁工具钢和塑料模具钢。

合金工具钢和高速工具钢的牌号表示方法与合金结构钢相同。但一般不标明含碳量数字（含碳量大于1.00%）。例如：平均含碳量为1.60%，含铬量为11.75%，含钼量为0.50%，含钒量为0.22%的合金工具钢，其牌号表示为Cr12MoV；平均含碳量为0.85%，含钨量为6.00%，含钼量为5.00%，含铬量为4.00%，含钒量为2.00%的高速钢，其牌号表示为W6Mo5Cr4V2；若平均含碳量小于1.00%时，可采用一位数字表示含碳量（以千分之几计）。例如：平均含碳量为0.80%，含锰量为0.95%，含硅量为0.45%的合金工具钢，其牌号表示为8MnSi。

（1）量具刃具钢　主要加入的合金元素（铬、硅、锰等）总量较少，但比碳素工具钢有较高的淬透性，而热硬性（刃具温度升至600℃时，其硬度大于60HRC）、硬度、耐磨性无明显改善。这类钢主要用来制造形状较复杂、截面尺寸较大的低速切削刃具和量具。例如量具有卡尺、千分尺、样板、量规等；刃具有钻头、板牙、丝锥、手术刀等。

量具刃具钢含碳量高（0.9% ~1.5%），其热处理一般为淬火加低温回火。经热处理后具有高的硬度和耐磨性，形状和尺寸稳定性较好。典型的量具刃具钢有9SiCr、Cr2 等。

常用量具刃具钢的牌号及用途见表 8-15。

表 8-15　常用量具刃具钢的牌号及用途

牌号	用　途
9SiCr	板牙、丝锥、钻头、铰刀、齿轮铣刀、拉刀等，冲模、冷轧辊等
Cr06	用作剃刀、刀片、手术刀具以及刮刀、刻刀等
Cr2	用作加工材料不很硬的低速切削刀具，可作样板、量规、冷轧辊等
9Cr2	用作冷轧辊、钢印、冲孔凿、冲模、冲头、量具及木工工具等

（2）耐冲击工具钢　是在 CrSi 钢的基础上加入钨元素，w（W）= 2.0% ~ 2.5%，以细化晶粒，提高回火后的韧性，例如 5CrW2Si 钢，主要用来制造风动工具、錾子、冲模、冷作模具等。

（3）冷作模具钢　用于制造使金属冷塑性变形的模具，如冲模、冷镦模、剪切模、拉丝模等，工作时承受大的弯曲应力、压力、冲击及摩擦。因此，这类钢具有高硬度、耐磨性、足够的强度和韧性，以及良好的淬透性。

常用冷作模具钢的牌号及用途见表 8-16。

表 8-16　常用冷作模具钢的牌号及用途

牌号	用　途
Cr12	冲模、冲头、钻套、量规、螺纹滚丝模、拉丝模等
Cr12MoV	截面较大、形状复杂、工作条件繁重的各种冷作模具等
9Mn2V	要求变形小、耐磨性高的量规、磨床主轴等
CrWMn	淬火变形很小、长而形状复杂的切削刀具及形状复杂、高精度的冲模

（4）热作模具钢　用于制造使用金属在高温下塑变成形的模具，如热锻模、热挤压模、金属压铸模等。这类模具在工作时承受很大的压力和冲击，并反复受热和冷却。因此，要求这类钢在高温下具有足够的强度、硬度、耐磨性和韧性，良好的导热性、抗热疲劳性、耐回火性及高的淬透性。常用的热作模具钢有 5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V 等。

常用热作模具钢牌号及用途见表 8-17。

表 8-17　常用热作模具钢牌号及用途

牌号	用　途
5CrMnMo	中小型锤锻模（边长≤300 ~400mm）和小压铸模
5CrNiMo	形状复杂、冲击载荷大的各种大、中型锤锻模
3Cr2W8V	压铸模，平锻机凸模和凹模、镶块、热挤压模等
4Cr5W2VSi	高速锤用模具与冲头，热挤压用模具，有色金属压铸模等

（5）塑料模具钢　是用来制造各类塑料制品的模具。由于各类塑料模具工作条件与环境比较复杂，对塑料模具钢的要求也比较复杂，如有的要求十分耐磨，有的要求高耐蚀性，有的要求耐高压、高温，有的要求塑料制品表面洁亮、透明等。因此，在选择模具钢时必须根据性能要求和经济性选用。常用塑料模具及其用钢见表 8-18。

表 8-18　常用塑料模具及其用钢

模具类型及工作条件	推 荐 用 钢
中小模具、精度不高、受力不大、生产规模小的模具	45、40Cr、T10、10、20、20Cr
受磨损较大、受较大动载荷、生产批量大的模具	20Cr、12CrNi3、20Cr2Ni4、20CrMnTi
大型复杂的注射成型模或挤压成型模	4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr3Mo3SiV、5CrNiMnMoVSCa
热固性塑料成型模、高耐磨高强度的模具	9MnV、CrWMn、Cr12、Cr12MoV、7CrSiMnMoV
耐腐蚀、高精度模具	20Cr13、40Cr13、95Cr18、3Cr2Mo、Cr14Mo4V8、Cr2MnWMoVS、3Cr17Mo
无磁模具	7Mn15Cr2Al3V2WMo

2. 高速工具钢

高速工具钢也称高速钢。高速工具钢可以磨出锋利的刃口，所以也称作锋钢。高速钢用于制造高速切削刃具（如车刀、刨刀、铣刀、滚刀、钻头、拉刀等），其工作温度高达 600℃仍保持高硬度（63～65HRC 左右），即具有良好的热硬性。

高速工具钢的成分特点是：含碳量高（0.7%～1.65%）以形成足够的碳化物，保证钢的高硬度、高耐磨性；加入合金元素钨、钼、钒等以提高钢的耐回火性和耐热性，并产生回火过程中的二次硬化效应；加入一定量的铬元素，以提高钢的淬透性。

由于合金元素的作用，高速工具钢中 $w(C)=0.7\%\sim0.8\%$ 时，钢的铸态组织中就出现大量共晶莱氏体组织。其共晶碳化物使钢的性能变坏，必须采用反复锻打的方法，使碳化物呈细小均匀状态分布，改善钢的性能。

高速工具钢的热处理为淬火加三次高温回火。常用 W18Cr4V 高速钢热处理工艺曲线如图 8-5 所示。

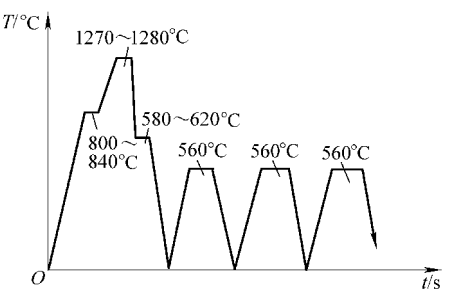


图 8-5　W18Cr4V 高速工具钢热处理工艺曲线

因 W18Cr4V 钢的导热性很差，加热时必须在 800～840℃保温一段时间（预

热），然后再加热到淬火温度，以防止在加热过程中变形、开裂；冷却时采用分级淬火方法防止冷却过程中变形、开裂。淬火后需经 550 ~ 570℃三次回火，目的是减少残留奥氏体数量，在回火过程中，残留奥氏体析出碳和合金元素，形成特殊碳化物（W_2C、VC 等），同时淬火马氏体也弥散析出细小的碳化物，使高速钢产生“二次硬化”，即具有高的热硬性。回火后形成由回火马氏体、少量残留奥氏体和碳化物组成的复相组织。

目前使用的通用型高速工具钢有 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 和 W9Mo3Cr4V 等三种。其中 W18Cr4V 是发展最早的高速工具钢，由于韧性较差逐渐由 W6Mo5Cr4V2 高速工具钢代替。W9Mo3Cr4V 高速工具钢是新的通用型高速工具钢，其性能较好，使用越来越广。常用高速工具钢的牌号及用途见表 8-19。

表 8-19　常用高速工具钢的牌号及用途

牌　　号	用　　途
W18Cr4V	高速切削车刀、钻头、铣刀、插齿刀、铰刀
W6Mo5Cr4V2	钻头、滚刀、拉刀、插齿刀
W9Mo3Cr4V	上述刀具，可代替 W6Mo5Cr4V2

8.4.6　不锈钢、耐热钢及特殊物理性能钢

不锈钢、耐热钢及特殊物理性能钢，用来制造在特殊工作环境下的零件或工具。生产中常用的特殊物理性能钢有无磁钢、磁钢和高电阻钢等。

不锈钢和耐热钢的钢号由代表碳含量的数字 + 合金元素符号和代表含量的数字组成。

在 2007 年颁布的有关不锈钢和耐热钢几个标准中作了新规定。一般用两位数字表示碳含量，其中：“06”表示 $w(C) \leqslant 0.08\%$，“10”表示 $w(C) \leqslant 0.12\%$，“12”表示 $w(C) \leqslant 0.15\%$，“20”表示平均碳含量 0.15% ~ 0.25%，从“30”至“90”以及“108”、“158”等均表示平均碳含量（% ×100）。少数钢号采用“03”表示 $w(C) \leqslant 0.04\%$。

超低碳和极低碳不锈钢用三位数字表示碳含量，其中：“022”表示 $w(C) \leqslant 0.030\%$，“015”表示 $w(C) \leqslant 0.020\%$，“008”表示 $w(C) \leqslant 0.010\%$

对钢中主要合金元素含量以百分之几表示，而对钛、铌、锆、氮、……则按照合金结构钢对微量合金元素的表示方法标出。少数新钢号对表示合金元素含量的数字稍作调整，例如：旧钢号 0Cr19Ni9N，新钢号为 06Cr19Ni10N。

1. 不锈钢

不锈钢是用来抵抗大气腐蚀或能抵抗酸、碱、盐等化学介质腐蚀的钢。还应有适当的力学性能，良好的冷、热加工性能和焊接性能。其抗腐蚀的原因主要是加入较多的铬、镍等合金元素，形成一层致密牢固的氧化保护膜与外界腐蚀介质隔绝；

另外合金元素可使钢中的基本相电极电位提高，也提高了抗蚀能力。

不锈钢按化学成分可分为铬不锈钢和铬镍不锈钢两大类；按在使用状态下钢的组织类型可分为铁素体型不锈钢、奥氏体型不锈钢、奥氏体－铁素体双相型不锈钢、马氏体型不锈钢等。

（1）铁素体型不锈钢　这类钢具有单相铁素体组织，具有耐蚀性好、塑性好、强度低等特点，常用来制造工作应力不大的化工设备、容器、管道及生活用品等。典型的铁素体型不锈钢是 10Cr17。

（2）马氏体型不锈钢　这类钢具有较高的力学性能和适中的耐蚀性等特点，常用来制造工作应力较大的汽轮机叶片、阀体、刀片等。典型的马氏体型不锈钢是 12Cr13、20Cr13 和 30Cr13 等。

（3）奥氏体型不锈钢　这类钢室温下具有单相奥氏体组织，具有优良的力学性能、耐蚀性和良好的塑性等特点，所以生产中应用最广泛。主要用来制造食品设备和化工设备的零件，耐酸容器、管道、电力机车安装螺栓等。典型的奥氏体型不锈钢是 06Cr19Ni10。

常见不锈钢的牌号及用途见表 8-20。

表 8-20　常见不锈钢的牌号及用途

牌号	用　　途
06Cr19Ni10	使用最广泛的不锈钢，用做食品、化工和原子能设备
06Cr19Ni10NbN	适用于制造需要一定强度的结构件
06Cr17Ni12Mo2Ti	用于耐硫酸、磷酸、醋酸的设备
10Cr17	建筑内装饰、重柴油燃烧器部件、家庭用具、家用电器部件
10Cr17Mo	汽车外装材料等
008Cr30Mo2	制作与乙酸、乳酸有机酸有关设备制造及苛性碱设备和部件等
12Cr13	要求较高韧性及受冲击的零件，如汽轮机叶片和一般刀具等
20Cr13	
30Cr13	制造较高硬度、一定耐磨性的刃具及喷嘴、阀门、医疗器械
14Cr17Ni2	具有较高强度、耐硝酸及有机酸腐蚀的零件、容器和设备

2. 耐热钢

耐热钢是在高温条件下仍能保持足够强度和能抵抗氧化而不起皮的钢。具有耐热性（即高温抵抗氧化性能）和高温强度（即蠕变强度）的综合性能。主要用于制造热工动力机械（汽轮机、燃气轮机、锅炉和内燃机）、化工机械、石油装置和加热炉等高温条件下工作的构件。为提高钢的高温强度常加入高熔点合金元素（如钨、钼）和抗蚀能力较强的合金元素（如铬、硅、铝）。

耐热钢按性能和用途可分为抗氧化钢和热强钢两类。按使用条件下的组织可分为奥氏体型、铁素体型、珠光体型、马氏体型等多种耐热钢。

（1）马氏体型耐热钢　这类钢的耐热性能较好，淬透性好。主要用于制造可在 500 ~ 650℃长期工作的零件。其典型钢是 13Cr13Mo、42Cr9Si2 等。

（2）铁素体型耐热钢　这类钢抗氧化性能较高，但高温强度较低。主要用于制造受力不大的加热炉构件，其工作温度可达 900 ~ 1050℃。其典型钢是 06Cr13Al、10Cr17 等。

（3）奥氏体型耐热钢　这类钢的性能与马氏体型耐热钢比较，耐热性较高，但热强度较低。主要用来制造工作温度可达 870℃长期工作的零件，如内燃机车的柴油机排气阀等。典型钢是 06Cr19Ni10 等。

常用耐热钢的牌号及用途见表 8-21。

表 8-21　常用耐热钢的牌号及用途

牌号	用　途
06Cr19Ni10	<870℃反复加热，锅炉过器、再热器等
45Cr14Ni14W2Mo	内燃机重载荷的气阀等
3Cr18Mn12Si2N	锅炉吊架、加热炉传送带、盘、炉爪等
06Cr13Al	燃气透平压缩机叶片、退火箱、淬火架等
10Cr17	<900℃耐氧化部件、散热器、炉用部件、喷嘴等
12Cr5Mo	锅炉吊架、燃气轮机衬套、泵的零件、活塞杆、高压加氢设备部件
40Cr10Si2Mo	内燃机进气阀、轻载荷发动机的排气阀等
158Cr12MoV	汽轮机叶片等
12Cr13	<800℃耐氧化、耐腐蚀部件

3. 磁钢

磁钢按性质与用途不同，可分为硬磁钢和软磁钢两类。

（1）硬磁钢（永久磁钢）　在外界磁场作用下被磁化后，如果撤去外磁场，能把大量的剩磁长期保留下来，为了消除剩磁就需很高的磁场强度。硬磁钢的特性具有高的剩磁、高的矫顽力（即不易退磁的能力）、磁性不随时间变化而改变。常用于无线电、通信工业，作永久磁体用。

硬磁钢的成分，一般含碳量较高（1% 左右），常加入的合金元素为铬、钨和钼等。这类钢可经淬火和回火，其硬度和强度较高、淬透性好、矫顽力高。

（2）软磁钢（电工硅钢）　主要制造电机、变压器等的铁心。软磁钢的性能特点是低的矫顽力，以节省反复磁化铁心所损耗的有用电能；高的电阻，减少铁心因磁化而引起的感应电流（涡流）损耗；高的磁感应强度，在同等功率条件下可缩小电机和变压器体积。此外，还具有良好的冲压性能和表面精度高等特点。

软磁钢的成分，一般含碳量很低（≤0.08%），含硅量较高，含其他杂质元素极少。这类钢主要加入元素硅，硅元素能溶解于 α－铁中，增加电阻，减少涡流损耗，有较高的磁感应强度。而碳与杂质（氧、硫等）元素的化合物都会降低钢的

磁性。

软磁钢按含硅量不同可分为：低硅钢（0.8% ~2.8%），用于制造振动较大的电机铁心；高硅钢（2.81% ~4.8%），用于制造变压器铁心。

软磁钢使用前可经退火，既可提高磁性，而且还有利于冲压加工。

此外还有一种无磁钢，即在电磁场作用下，不引起磁感或不被磁化的钢，由于这类钢不受磁感应作用，也就不干扰电磁场。故常用于电机上绑扎钢丝绳和护环、变压器的盖板、电动仪表壳体与指针等。

8.5 有色金属

有色金属是除钢铁以外的其他金属，有色金属的种类很多，其产量虽不及钢铁，但是由于它们具有许多特殊的性能，如高的导电性和导热性、较低的密度和熔化温度、良好的力学性能和工艺性能等。因此，它也是现代工业生产中不可缺少的重要的金属材料。

有色金属产品分为冶炼产品、加工产品和铸造产品三大部分。纯金属冶炼产品分为工业纯度及高纯度两类。有色金属及合金加工产品，按金属及合金系统分为铜及铜合金、铝及铝合金等。铸造产品，分为铸件和铸锭。按不同的合金系统又可分为铸造铝合金、铸造黄铜、铸造青铜等。

8.5.1 铜及铜合金

1. 纯铜

纯铜的熔点为1083℃，密度为8.9g/cm^3。纯铜的导电性和导热性仅次于金和银，且有良好的抗磁性、耐蚀性（抗大气和海水腐蚀）。纯铜的塑性很好（δ = 45% ~ 50%），容易进行热压力或冷压力加工。但纯铜的抗拉强度不高（σ_b = 200 ~ 400MPa），硬度很低，一般不宜做结构材料。

工业纯度的加工铜可用作导电、导热和耐蚀材料。例如制造电线、蒸发器等。

加工铜的代号用汉语拼音字母T加顺序号表示。顺序号数字越大，则纯度越低。例如T2表示2号纯铜。

2. 铜合金

铜合金的特点是有优良的导电、导热性，较好的耐蚀性，较高的强度、耐磨性，很好的塑性，易拉成细丝，轧成薄材，也可铸造各种零件。常用铜合金分类如下：

黄铜

按化学成分分。普通黄铜、特殊黄铜。

按加工工艺方法分。加工黄铜、铸造黄铜。

白铜

按化学成分分。普通白铜、特殊白铜。

青铜

按化学成分分。锡青铜、无锡青铜、特殊青铜。

按加工工艺方法分。加工青铜、铸造青铜。

（1）黄铜　是以铜为基体金属，由铜和锌组成的合金。

1）加工黄铜

① 普通黄铜是指黄铜中可含有或不含有其他合金元素。锌的含量对黄铜的组织与性能有很大影响。在室温平衡状态下，铜锌二元合金有 α 及 β 两个基本相。当锌的含量小于 39% 时，锌全部溶于铜成为 α 固溶体，即单相黄铜或 α 黄铜，此时黄铜的强度高，室温下塑性很好，可用冲压法生产各种容器；当锌的含量在 39% ~45% 时，除了有 α 固溶体外，组织中还出现以化合物 CuZn 为基的 β 固溶体，即 α + β 的双相黄铜，此时强度仍高，室温下塑性差，但 470℃以上塑性很好，适宜热压力加工，常用于制造散热器、油管、垫片、螺钉等；当锌的含量大于 45% 时，塑性很差，强度降低，在生产中已无实用价值。

② 特殊黄铜是含有其他合金元素的黄铜。常加入的合金元素有锡、硅、锰、铅和铝等，分别称为锡黄铜、硅黄铜、锰黄铜等，其目的是为了改善黄铜的性能。例如，加入铅能改善黄铜的切削加工性能；加入硅能增加黄铜的强度和硬度，且与铅一起能增加黄铜的耐磨性；黄铜中再加锡得到锡黄铜，俗称海军黄铜，锡能提高黄铜的强度，并显著提高其对海水的抗蚀性。锡黄铜可用于舰艇零件、弱电用零件等。

加工黄铜的代号用 H 加基元素铜的含量表示。三元以上黄铜用 H 加第二主加元素符号及除锌以外的成分数字组表示。例如 H68 表示 $w(\mathrm{Cu})=68\%$ 的普通黄铜。H68 属单相 α 黄铜，有较高强度和冷、热加工变形能力，适宜于冲压制造形状复杂的零件。HSn90 - 1 表示 $w(\mathrm{Cu})=90\%$，第二主加元素为 Sn，$w(\mathrm{Sn})=1\%$ 的锡黄铜。

常用加工黄铜的牌号、代号、化学成分和用途见表 8-22。

表 8-22　常用加工黄铜的牌号、代号、化学成分和用途

组别	牌号	代号	化学成分（%）		用途
			Cu	其他	
普通黄铜	90 黄铜	H90	88.0 ~ 91.0	余量 Zn	热双金属、水管、艺术品等
	68 黄铜	H68	67.0 ~ 70.0	余量 Zn	冷凝器管、弹壳等
	62 黄铜	H62	60.5 ~ 63.5	余量 Zn	螺钉、散热器垫圈、弹簧等

（续）

组别	牌号	代号	化学成分（%）		用途
			Cu	其他	
特殊黄铜	90－1 锡黄铜	HSn90－1	88.0～91.0	0.25～0.75Sn 余量 Zn	汽车、拖拉机的弹性套管等
	80－3 硅黄铜	HSi80－3	79.0～81.0	2.5～4.0Si 余量 Zn	船舶零件、水管等
	58－2 锰黄铜	HMn58－2	57.0～60.0	1.0～2.0Mn 余量 Zn	弱电流工业用零件
	61－1 铅黄铜	HPb61－1	59.0～61.0	0.6～1.0Pb 余量 Zn	结构零件，如分流器、导电排等
	59－3－2 铝黄铜	HAl59－3－2	57.0～60.0	2.5～3.5Al 2.0～3.0Ni 余量 Zn	在海水中工作的高强度零件，耐腐蚀的高强度零件

2）铸造黄铜：铸造性能较好，其熔点比纯铜低，且结晶温度间隔较小，使黄铜有较好的流动性、较小的偏析倾向、铸件组织致密。

《铸造有色金属及其合金牌号表示方法》（GB/T 8063—1994）规定：铸造有色合金牌号由 Z 和基体金属元素的化学元素符号、主要合金元素化学符号（其中混合稀土元素符号统一用 RE 表示）以及表示合金元素名义百分含量的数字组成，优质合金牌号后面标注 A。在合金牌号前面冠以 YZ 字母表示为压铸合金。例如 ZCuZn40Mn2 表示，名义百分含量为：$w(Zn)=40\%$，$w(Mn)=2\%$，余量为铜的铸造黄铜。

常用铸造黄铜的牌号、名称、化学成分和用途见表 8-23。

表 8-23 常用铸造黄铜的牌号、名称、化学成分和用途

牌号	名称	化学成分（%）		铸造方法	用途
		Cu	其他		
ZCuZn38	38 黄铜	60.0～63.0	余量 Zn	S J	法兰、阀座、手柄、螺母
ZCuZn25Al6Fe3Mn3	25－6－3－3 铝黄铜	60.0～66.0	Al4.5～7.0 Fe2.0～4.0 Mn1.5～4.0 其余 Zn	S J	耐磨板、滑块、蜗轮、螺栓

（续）

牌号	名称	化学成分（%）		铸造方法	用途
		Cu	其他		
ZCuZn40Mn2	40－2 锰黄铜	57.0～60.0	Mn1.0～2.0 余量 Zn	S	在淡水、海水、蒸汽中工作的零件，如阀体、阀杆、泵管接头
				J	
ZCuZn33Pb2	33－2 铅黄铜	63.0～67.0	Pb1.0～3.0 余量 Zn	S	煤气和给水设备的壳体，仪器构件
				J	

注：力学性能中 S 为砂型，J 为金属型。

（2）白铜　是铜镍合金，白铜中除镍外还有少量锰、铁、锌、铝等元素。因价格昂贵，一般用于制造要求力学性能较高、耐蚀性较好的化工设备、船舶、精密机械零件，也可用于制造具有特殊热电性能的精密电工测量仪器、变阻器和热电偶等。

（3）青铜　除了黄铜和白铜外，其他铜合金都称为青铜，因铜与锡的合金呈青色而得名。青铜是人类历史上应用最早的合金，青铜中除锡青铜以外的其余铜合金均叫无锡青铜。一般向铜中加入铝、锰、硅、铍、铅等元素（二元或多元）。无锡青铜一般都具有高的强度，良好的耐蚀性、耐磨性，有的还具有高导电、导热性和热强性，是锡青铜的代用品。其中铝青铜化学稳定性好，强度硬度高，可锻压成重要的齿轮、蜗轮、轴套和其他零件。铍青铜可接受淬火及人工时效，其强度、弹性极限、疲劳极限都很好，主要用于弹性构件。按加工方法分为加工青铜和铸造青铜两类。

1）加工青铜

① 锡青铜是铜锡合金，工业用的锡青铜，其含锡量一般在 3%～4%，通常小于 7%。具有较好的塑性和适当的强度，适于压力加工。其铸造性能特别好，且耐腐蚀、耐磨损。多用于制造耐磨损零件及与酸、碱、蒸汽等腐蚀性气体相接触的零件。

锡青铜在大气、海水、淡水及高压过热蒸汽中的耐蚀性比纯铜和黄铜高，在青铜中加入磷、锌、铅等元素，可以改善锡青铜的耐磨性、抗磁性、低温韧性及铸造性能、切削加工性等。锡青铜主要用于制作轴承、轴套等耐磨零件（如内燃机车连杆上的轴套）、弹性元件、耐蚀、抗磁零件等。

② 铝青铜是以铝为主加元素的铜合金。一般含铝量为 5%～10%。铝青铜比黄铜和锡青铜有更好的耐蚀性、耐磨性和耐热性及更高的力学性能。还可以进行淬火和回火来进一步强化其力学性能。常用来制造强度及耐磨性要求很高，在复杂条件下工作的摩擦零件和高耐蚀的弹性元件，如齿轮、蜗轮、蜗杆、传动轴的衬套、弹簧等。

③ 铍青铜是以铍为主加元素的铜合金。含铍量一般为 1.5%～1.6%。铍青铜

的导热性、导电性、耐寒性均非常好，同时还具有抗磁性，受冲击时不产生火花等特殊性能，是一种综合性能优良的金属材料。常用于高级精密的弹性元件及特殊要求的耐磨零件。如各种精密仪器、仪表中的重要弹簧片、膜片、膜盒等弹性元件。除此以外，还常用于防爆工具及电接触器中要求不产生火花的零件。

④ 硅青铜以硅为主加元素的铜合金。硅青铜弹性好，耐蚀性高，具有良好的铸造性能和冷热压力加工性能。航天、航空工业中应用较广，常用来制作导向衬筒、齿轮、蜗轮等。

铝青铜、铍青铜、硅青铜等不含锡元素的青铜属特殊青铜（又叫无锡青铜）。

加工青铜的代号用Q加第一个主加元素符号及平均百分含量、其他成分平均含量数字组表示。例如QSn4－3表示：$w(Sn)=4\%$，$w(Zn)=3\%$，余量为铜的锡青铜。

常用加工青铜的牌号、代号、化学成分、力学性能及用途见表8-24。

表8-24 加工青铜的牌号、代号、化学成分、力学性能及用途

牌号	代号	化学成分（%）		用 途
		第一主加元素	其他	
4－3锡青铜	QSn4－3	Sn3.5～4.5	Zn2.7～3.3 余量Cu	弹性元件、管配件、化工机械中耐磨零件及抗磁零件
6.5－0.1锡青铜	QSn6.5－0.1	Sn6.0～7.0	P0.1～0.25 余量Cu	弹簧、接触片、振动片、精密仪器中的耐磨零件
4－4－4锡青铜	QSn4－4－4	Sn3.0～5.0	Pb3.5～4.5 Zn3.0～5.0 余量Cu	重要的减摩零件，如轴承、轴套、蜗轮、丝杠螺母
7铝青铜		Al6.0～8.0	余量Cu	重要用途的弹性元件
9－4铝青铜	EQAl9－4	Al8.0～10.0	Fe2.0～4.0 余量Cu	耐磨零件，如轴承、蜗轮、齿圈；在蒸汽及海水中工作的高强度、耐蚀零件
2铍青铜	QBe2	Be1.8～2.1	Ni0.2～0.5 余量Cu	重要的弹性元件、耐磨件及在高速、高压、高温下工作的轴承
3－1硅青铜	QSi3－1	Si2.7～3.5	Mn1.0～1.5 余量Cu	弹性元件，在腐蚀介质下工作的耐磨零件，如齿轮

2）铸造青铜：含锡量为7%～10%的锡青铜，由于塑性较差，只适于铸造。由于锡青铜具有良好的铸造性，能浇注形状复杂、壁厚较大的铸件，铸件形状精确。我国古代的工艺品大多用锡青铜铸造而成。但锡青铜在铸造时，因体积收缩小，易形成分散的细小缩孔，因此可铸造形状复杂、致密性要求不高的铸件。

铸造青铜的牌号表示方法同铸造黄铜。例如ZCuSn10P1表示，名义百分含量为：$w(Sn)=10\%$，$w(P)=1\%$，余量为铜的铸造锡青铜。

常用铸造青铜的牌号及用途见表 8-25。

表 8-25　铸造青铜的牌号及用途

牌号	名称	铸造方法	用　途
ZCuSn10Zn2	10－2 锡青铜	J	在中等及较高负荷下工作的重要管配件、泵、齿轮、阀等
		S	
ZCuSn10Pb1	10－1 锡青铜	J	重要的轴瓦、齿轮、连杆、套圈和轴套等
		S	
ZCuAl10Fe3	10－3 铝青铜	J	重要用途的耐磨、耐蚀的重要铸件，如轴套、螺母、蜗轮等
		S	
ZCuPb30	30 铅青铜	J	高速双金属轴瓦、减摩零件等

注：J 为金属型铸造，S 为砂型铸造。

8.5.2　铝及铝合金

铝及其合金是应用较广泛的一类金属材料，其产量仅次于钢铁，广泛用于电气、航天、汽车、机车、车辆等部门。其特点是：密度小、比强度大、耐蚀性好、导电、导热、无铁磁性、反光能力强、塑性大、易加工成材和铸造各种零件。铝合金用途广泛，凡要求重量轻、比强度高的零件（如飞机、汽车、拖拉机上的某些零件）均可用铝合金制造。

我国变形铝及铝合金采用国际四位数字体系牌号和四位字符体系牌号两种命名方法。按化学成分，在国际牌号注册组织注册命名的铝及铝合金，直接采用四位数字体系牌号；国际牌号注册组织未命名的，则按四位字符体系牌号命名。

两种牌号命名方法的区别仅在第二位。牌号第一位数字表示铝及铝合金的组别，1×××，2×××，3×××，……，9×××，分别按顺序代表纯铝（含量 99.00%），以铜，以锰，以硅，以镁，以镁和硅，以锌，以其他合金元素为主要合金元素的铝合金及备用合金组；牌号第二位数字（国际四位数字体系）或字母（四位字符体系）表示原始纯铝或铝合金的改型情况，数字 0 或字母 A 表示原始合金，如果是 1～9 或 B～Y 表示为改型情况；最后两位数字用以标识同一组中不同的铝合金，纯铝则表示最低铝百分含量中小数点后面的两位。

1. 纯铝

纯铝的含铝量最少为 99.0%。银白色，熔点 657℃，密度为 2.72g/cm^3，仅为铁的三分之一，是一种轻型金属。纯铝的导电性、导热性好，且和氧的亲和力强，容易在其表面形成致密的 Al_2O_3 薄膜，能有效地防止金属的继续氧化，在大气中有良好的耐蚀性。纯铝的塑性好（$\psi \approx 80\%$），但强度低（$\sigma_b \approx 80 \sim 100$MPa）。冷变形是提高其强度的唯一手段，经形变强化后强度可提高到 150～250MPa，而塑性则

下降到 $\psi = 50\% \sim 60\%$。纯铝中常见的杂质是铁和硅，杂质越多，纯铝的导电性、耐蚀性及塑性越低。

纯铝牌号用 1 × × × 四位数字系列表示。如 1070、1060、1050 等。其中 1060 表示含纯铝为 99.60% 的工业纯铝。工业纯铝主要用于熔炼铝合金，制造电线、电缆以及要求具有导热、耐蚀，且对强度要求不高的一些用品和器皿等。

2. 铝合金

铝合金是以铝为基础，加入一种或几种其他元素（如铜、镁、硅、锰、锌等）构成合金。强度提高，还可经过冷变形加工和热处理等方法进一步强化。所以铝合金还具有良好的耐蚀性和加工性，可以制造某些结构零件。

铝合金一般可分为变形铝合金和铸造铝合金两类。

变形铝合金因其塑性较高，适于压力加工，故称为变形铝合金。变形铝合金还可按主要性能特点分为防锈铝、硬铝、超硬铝和锻铝等。

铝合金的热处理机理与钢不同。一般钢经淬火后，硬度和强度立即提高，塑性下降。铝合金则不同，能进行热处理强化的铝合金，淬火后硬度和强度不能立即提高，而塑性与韧性却显著提高。但在室温放置或稍高于室温保持一段时间后，其硬度和强度才显著提高，塑性与韧性则明显下降。这种合金工件经固溶处理后在室温或稍高于室温保温，以达到沉淀硬化的目的称为时效处理。时效处理分为自然时效处理和人工时效处理两种。合金工件经固溶处理后在室温进行的时效处理称为自然时效处理；合金工件经固溶处理后在室温以上温度的时效处理称为人工时效处理。

铝合金常用的热处理方法有退火、淬火和时效处理等。退火可消除加工硬化，恢复塑性变形能力；消除铸件的内应力和成分偏析。淬火也称“固溶处理”，目的是获得均匀的过饱和固溶体。时效处理可使淬火铝合金的强度达到最高。淬火、时效处理是强化铝合金的主要途径之一。

（1）变形铝合金　分为防锈铝合金（LF）、硬铝合金（LY）、超硬铝合金（LC）和锻铝合金（LD）四类。

1）防锈铝主要是 Al – Mn 系和 Al – Mg 系合金。属于热处理不能强化的变形铝合金，只能通过冷压力加工提高强度，具有适中的强度和优良的塑性，并具有很好的耐蚀性。强度比纯铝高，仍有良好的塑性，焊接性也好，通常用于制造油箱、管道。

2）硬铝属于 Al – Mg – Cu 系合金。这类铝合金经固溶和时效处理后能获得相当高的强度、硬度。硬铝的耐蚀性比纯铝差，更不耐海洋大气的腐蚀，所以有些硬铝的板材常在表面包覆一层纯铝后使用。飞机结构支架、翼肋、螺旋桨、发动机支架等常用硬铝制造。

3）超硬铝属于 Al – Mg – Cu – Zn 系合金。这类铝合金是在硬铝的基础上再加锌元素，其强度高于硬铝，但耐蚀性较差，一般表面也包一层纯铝，以增加耐蚀性。超硬铝经固溶处理和人工时效处理后，强度很高。

4）锻铝大多属于 Al－Mg－Cu－Si 系或 Al－Mg－Cu－Ni 系合金。力学性能与硬铝相近，有良好的锻造性能及耐蚀性，适合于锻造。这类合金通过固溶处理和人工时效，使材料获得较好的强化效果。

用四位字符体系表示牌号，例如 5A02，其中 5 表示以镁为主要合金元素的铝合金，A 表示原始合金，02 表示 02 号。常用变形铝合金牌号和用途见表 8-26。

表 8-26　常用变形铝合金牌号和用途

类别	牌号	半成品种类	用　途
防锈铝合金	5A02	冷轧板材 热轧板材 挤压板材	在液体下工作的中等强度的焊接件、冲压件和容器、骨架零件等
	3A21	冷轧板材 热轧板材 挤制厚壁管材	要求高的可塑性和良好的焊接性，在液体或气体介质中工作的低载荷零件如油箱、油管、液体容器、饮料罐
硬铝合金	2A11	冷轧板材（包铝） 挤压棒材 拉挤制管材	用作各种要求中等强度的零件和构件，冲压的连接部件，空气螺旋桨叶片，局部较粗的零件（如螺栓、铆钉）
	2A12	冷轧板材（包铝） 挤压棒材 拉挤制管材	用量最大，用作各种要求高载荷的零件构件（但不包括冲压件和锻件），如飞机上的骨架零件、蒙皮、翼梁、铆钉等，150℃以下工作的零件
	2B11	铆钉线材	主要用于铆钉材料
超硬铝	7A03	铆钉线材	受力结构的铆钉
	7A04 7A09	挤压棒材 冷压板材 热压板材	用作承力构件和高载荷零件，如飞机的大梁、衍条、dL 强框、蒙皮、翼肋、起落架零件等，通常多用以取代 2A12
锻铝合金	2A50 2A70 2A80	挤压棒材 挤压棒材 挤压棒材	形状复杂和中等强度的锻件和冲压件，内燃机活塞、压气机叶片、叶轮、圆盘以及其他在高温下工作的复杂锻件。2A70 耐热性好
	2A14	热轧板材	高负荷和形状简单的锻件、模锻件

（2）铸造铝合金　按其所加合金元素的不同，铸造铝合金可分为：Al－Si 系、Al－Cu 系、Al－Mg 系、Al－Zn 系四类。

GB/T 1173—1995《铸造铝合金》规定：铸造铝合金牌号表示方法按 GB/T 8063—1994 进行，即由 Z 和基体金属的化学元素符号、主要合金元素化学元素符号以及表明合金化学元素名义百分含量的数字组成。例如 ZAlSi12 表示，名义百分含量为 $w(\mathrm{Si})=12\%$ 的铸造铝合金。

GB 1173—1995 规定，铸造铝合金代号由字母 ZL 及其后三位阿拉伯数字组成。

ZL后面第一个数字表示合金系列，其中1、2、3、4分别表示铝硅、铝铜、铝镁、铝锌系列合金，ZL后面第二、三两个数字表示顺序号。例如ZL102表示铝硅系02号铸造铝合金。

铸造铝合金与变形铝合金相比，合金元素的含量较高，具有良好的铸造性能，但塑性与韧性较低，不能进行压力加工。

1）Al－Si系：由铝、硅两种元素组成的合金称简单硅铝明（硅铝明，即英文铝硅合金Silumin的音译），除铝硅外还加入其他元素的合金称特殊硅铝明。简单硅铝明为热处理不能强化的铝合金，故强度不高。特殊硅铝明因加入铜、镁、锰等元素使合金强化，并可通过热处理进一步提高力学性能。该系合金有良好的铸造性能，可用于制造内燃机活塞、气缸体、水冷的气缸头、气缸套、风扇叶片、形状复杂的薄壁零件以及电动机、仪表的外壳、油泵壳体等。

2）Al－Cu系：铝铜合金强度较高，加入镍、锰提高耐热性，它在较高温度下仍具有足够的强度和热压加工性能。用于制造在高温下工作的复杂锻件和结构件，如内燃机活塞等。

3）Al－Mg系：铝镁合金有良好的耐蚀性，可用于制造在腐蚀介质条件下工作的零件，如泵体、泵盖及轮船配件等。

4）Al－Zn系：铝锌合金有较高强度，价格便宜，用于制造医疗器械、仪表零件、飞机零件和日用品等。

铸造铝合金可采用变质处理细化晶粒。变质处理是在熔融金属中加入少量的一种或几种元素或化合物，改变金属或合金的结晶组织，使性能得到改善的操作。即在铝合金中加入氟化钠和氯化钠的混合盐（2/3NaF＋1/3NaCl），加入量为合金重量的1%～3%。这些盐和液态铝相互作用，经变质处理后，使抗拉强度提高30%～40%，伸长率提高1%～2%。

常用的铸造铝合金的牌号特点及用途见表8-27。

表8-27 铸造铝合金的牌号特点及用途

类别	牌号	代号	特点	用途
铝硅合金	ZAlSi12	ZL102	铸造性好，力学性能低	形状复杂的砂型、金属型和压力铸造零件，如仪表、抽水机壳体；在200℃左右工作的零件，如油泵壳体、风冷发动机匣等
	ZAlSi7Mg ZAlSi7Cu4 ZAlSi5CuMg	ZL101 ZL107 ZL105	兼有良好的铸造性能和力学性能	
铝铜合金	ZAlCu5Mn	ZL201	耐热性好，铸造性及耐蚀性差	砂型铸造在175～300℃下工作的零件，如挂梁架、内燃机气缸头、活塞等
铝镁合金	ZAlMg10	ZL301	力学性能较高，耐蚀性好	砂型铸造在大气或海水中工作的零件，承受大振动载荷，工作温度不超过150℃的零件
铝锌合金	ZAlZn11Si7	ZL401	力学性能较高，宜于压铸	压力铸造零件，工作温度不超过200℃，结构形状复杂的汽车、飞机零件

8.6 钢铁的化学处理

钢铁的化学处理是指钢铁零件的发蓝处理和磷化处理。

1. 发蓝处理

将钢铁零件浸入苛性钠和亚硝酸钠水溶液中，在一定温度下使零件表面生成一层致密的 Fe_3O_4 膜。该膜黑里透蓝故称发蓝。发蓝的主要目的是提高零件的耐蚀性。

传统发蓝工艺流程是：化学脱脂——热、冷水洗——酸洗——流动冷水洗——一次氧化发蓝——二次氧化发蓝——非流动冷、热水洗——补充处理——流动冷、热水洗——烘干——浸油。

常用发蓝液配方及工艺条件是：

一次氧化发蓝液为 NaOH 500～600g/L，$NaNO_2$ 100～150g/L。发蓝温度和时间为 135～140℃，15～20min。

二次氧化发蓝液为 NaOH 700～800g/L，$NaNO_2$ 150～200g/L。发蓝温度和时间为 145～152℃，60～90min。

补充处理是为了提高发蓝膜的耐蚀能力。工艺是：铬酸钾或肥皂液 30～50g/L，90℃，10～15min。

2. 磷化处理

将钢铁材料浸入磷酸盐水溶液，在一定温度下使其表面获得一层不溶于水的磷酸盐薄膜的工艺过程，叫做磷化处理，简称为磷化。

磷化的零件表面呈灰色或暗灰色。磷化膜厚度为 5～15μm。远大于发蓝膜，抗大气腐蚀的能力也高于发蓝。电绝缘性较高，摩擦因数较小。但是磷化膜硬度、强度低，脆性较大。主要用于零件表面的润滑和防锈保护。

传统的磷化工艺流程是：化学脱脂——热、冷水洗——硫酸酸洗——冷水洗——铬酸酸洗——冷水洗——盐酸弱腐蚀——冷水洗——中和处理——冷水洗——磷化处理——冷、热水洗——补充处理——冷、热水洗——烘干——浸油。

磷化液配方：磷酸锰铁盐 35g/L、硝酸锌 70～100g/L、硝酸锰 25～40g/L。

磷化工艺温度 60～70℃，磷化时间 7～15min。

8.7 金属的表面镀饰

金属的表面处理是指对成品金属零件表面进行的涂镀处理。与化学热处理不同之处在于表面处理不是通过改变零件原表面的化学成分使零件表面改性，而是在零件原表面上增加一层或多层涂层。涂层与零件表面之间有足够的结合强度，两者成为一体。涂层成为零件的新表面，使零件表面具有所涂涂层的性能，从而起到零件

表面改性或装饰的目的。

金属表面处理按工艺方法不同，可分为化学镀、电镀、真空离子镀、热浸镀、热喷涂等。

8.7.1 电镀

一般金属电镀上的银白色、金黄色镀层，除了有防腐蚀作用之外，还有增加耐磨、自润滑、易于脱模和便于焊接等特殊功用。还是美化产品的有效手段。

电镀的出现，理想地满足了人们对金属表面装饰、保护的需求。通常的方法是将零件浸入待镀金属盐的电解溶液中并接负电极，加一定的直流电压，使零件表面形成一层所需金属的镀层，这种工艺方法称电镀。工业上常用的电镀有：镀锌、镀铬、镀铜、镀银、镀金等。可根据需要来确定电镀镀层的厚度，一般是 10 ~ 100μm 不等。

下面以用处最多的镀铬为例加以介绍。因为铬本身就有较高的硬度（800 ~ 1000HV），而且在大气中又易形成致密的 Cr_2O_3 膜，其硬度可达 1100HV。零件表面镀铬主要是为了提高表面硬度、耐磨性和耐蚀性，因此称为镀硬铬。若调整镀铬工艺参数和电解液成分，还可进行硬度较低但装饰效果好的乳白镀铬和镀黑铬等。

镀硬铬工艺流程是：抛光——脱脂——温、冷水洗——硫酸弱腐蚀——冷水洗——预热——阳极腐蚀——镀铬——冷水洗——烘干——抛光——汽油洗——除氢。

镀硬铬工艺：镀铬液配方铬酐 200 ~ 250g/L，硫酸 2 ~ 2.5g/L，电流密度 30 ~ 35A/dm^2，温度 55 ~ 60℃，时间 0.5 ~ 3min。

还有一种仿金电镀工艺。它不像以前只能镀纯金，即使是金与其他金属所成的金合金也可以镀上。市场上从 14K ~ 24K 的各种金含量的镀金首饰，都可以是仿金电镀的制品。此外，也可根据所需的金合金的颜色，选择不同的金属与金组成合金进行电镀。例如要获得玫瑰金的镀层，可选用金 - 铜合金；要获得绿金的色泽效果，可选用金—银合金；仿汉弥登金，可用金 - 钴 - 铟三元合金。

银镀层也广泛用作装饰，而且还有许多不为人们注意的优点。例如在管乐器上镀银，不仅使其外观洁白，而且音色更美；在餐具上镀银，银离子可杀灭水中的某些生物。不过，银容易与空气中的硫化物作用而变为褐色，所以镀银层上往往另镀上一薄层耐腐蚀的铑。市场上有一种银白色戒指，美若白金，就是采用这类工艺制造的。

除了装饰作用外，由于金和银具有良好的导电性和高频特性，所以镀金、银还常用于电子零件及印制电路板的电镀。为了节约用金，常采用多层镀金的方法；底层镀含金量低的金合金，面层镀纯金。

电镀与化学镀对环境有污染，应注意环保措施。

8.7.2 电刷镀

电刷镀是一种特殊方法的工艺，电镀时不需电镀槽，仅使用形如刷子的镀笔，所以又称无槽高速电镀。

该工艺采用的电镀液，金属离子沉积得快，即形成镀层迅速。电镀时，电流密度相应要求较通常电镀的高。被镀工件接直流电源的负极，阳极则采用以纤维织物包裹的高纯石墨棒——镀笔。镀笔上的纤维织物饱蘸了高速电镀液后，以其与工件上的待镀部位接触。在电场作用下，镀液中的金属离子就向阴极（工件）移动，沉积下来成为牢固的镀层。

这种工艺主要用于维修或作为耐磨镀层。当零件发生局部磨损或零件的某一部位加工过头时，常采用此法进行修复。此外，对于体积太大，无法放入镀槽电镀的零部件，对于难以从机器上拆卸下来的或拆装费用昂贵的零部件，对于只需局部电镀的大件或不通孔、深孔以及难镀的狭缝等，均可采用高速选择性电镀法进行。电刷镀技术得到的镀层与槽镀能得到的镀层在质量上是一样的。能够用于提高防腐蚀性、耐磨性、导电性、钎焊性等目的。尤其是能够高速度得到厚镀层，对磨损、切削加工误差的部件，用此法容易恢复尺寸。并可得到针孔少的电镀层。而且，因阳极包布对被镀面进行了摩擦，可看出对基本体的凹凸不平也有相当好的整平效果。与槽镀相比电刷镀有以下优点：

1）方便性。电刷镀类似于弧焊工，可以把设备很方便地带到要镀的场所。

2）操作容易。只要经短时间的讲解，任何人都能操作，不需特别的专门电镀知识。

3）快速性。沉积速度是槽镀的 30 ~ 60 倍。

4）质量便于管理。在工厂使用充分保证质量的电解液和精度高的机械设备，可以准确地控制镀层厚度。可以修正轴、孔的锥度和圆度误差。

5）工艺制度完善。对各种金属的前处理工艺完善，对铝、不锈钢等也能得到附着牢固的镀层。

6）应用场合。即使是组装着的机械，也不必拆卸部件，而可在必要的部位进行电镀。

7）可镀大工件。由于不入电镀槽，所以可解决大的、长的、重的零件的电镀问题。

8）遮蔽。可以省去或减少进行遮蔽和去除遮蔽的麻烦。

9）无热变形。由于工艺温度一般不超过 60℃，所以用于热变形敏感的轴、模具等工件，不必担心热变形。

10）镀层的修补。在镍、硬铬等上面也能重叠镀。所以能对不良镀层或厚度不足部位进行补镀。

11）同轴度高。由于工件在转动情况下电镀，镀层在圆周方向基本一致，不

会产生圆度误差。

8.7.3 复合电镀

复合电镀的主要特点是在电镀液中加入平均粒径仅数微米的非金属微粒。电镀时，强烈搅拌镀液，镀液中的金属离子在电场作用下向阴极（零件）沉积，而非金属微粒虽然不带电但在搅拌中碰上阴极也会沉积下来，因此在零件表面形成了金属－非金属镀层。

复合电镀的另一种更普遍的工艺，是在镀液中加入阳离子活化剂。它的分子带正电荷，吸附在微粒表面上就使微粒也带有正电荷。电镀时，在电场力作用下，这些带正电的微粒就会与金属阳离子一起向阴极移动，并在阴极沉积下来。

电镀溶液主要是镀镍溶液，有时也用镀钴溶液，而根据所需获得的功能来选择非金属微粒。例如，为了提高镀层的硬度，可在镀镍液中加入氧化铝、碳化硅或金刚石等微粒。这种镍－金刚石复合镀层具有很高的硬度，常作为优良的切削材料应用于刀具、磨具等，甚至应用于齿科牙钻等医疗设备。

对于造纸用的滚筒，纺织机械中送丝用的辊轮和导轨，以及那些既要求耐磨又要求润滑的零件等，镀液中常加入二硫化钼微粒。

钢铁工业中的水平连续浇铸工艺所采用的结晶器上，需要既耐高温又具润滑性的镀层，为此可加氟化石墨微粒。

为了易于从模具中取出浇在其中的塑料、橡胶等制品，常选用脱模剂加强润滑。倘若用镍－氟化石墨或镍－含氟高分子化合物等镀层作模具内表层，就可大大提高模具的润滑性，无须脱模剂就能顺利脱模，并延长模具的使用寿命。

如果在普通镀镍液中加入平均粒径仅为3.5～4.5μm的密胺树脂荧光颜料，所得的镀层即带有荧光性能，受光照射就能发出荧荧幽光，很是奇特。

8.7.4 真空离子镀

真空离子镀属于气相沉积技术。它可分为化学气相沉积（CVD）和物理气相沉积（PVD）两大类。其中PVD不仅可以对钢铁材料进行表面处理，还可以对纸张、塑料、玻璃、陶瓷等非金属材料进行表面镀膜。不仅可以镀防腐膜、装饰膜和超高硬度的抗磨膜、半导体、绝缘体、不同成分比的合金、化合物及部分有基聚合物等的薄膜，还可以镀各种功能膜如微电子膜、超导薄膜、太阳能膜、气敏光敏膜等，其适用范围之广是其他方法无法与之比拟的。同时，可以不同的沉积速率、不同的基材温度和不同的蒸气分子入射角蒸镀成膜，因而可得到不同显微结构和结晶形态（单晶、多晶或非晶等）的薄膜，且薄膜的纯度很高，易于在线检测和控制薄膜的厚度与成分。厚度控制精度最高可达单分子层量级，排出污染物很少且基本上没有，无“三废”公害。

真空离子镀膜是在真空条件下进行的，需要专门的设备。它是真空技术的一个重要应用分支。它置待镀材料和被镀基材于真空室内，采用一定方法加热待镀材料，使之蒸发或升华，并飞溅到被镀基材表面凝聚成膜的工艺。在真空条件下成膜可减少蒸发材料的原子、分子在飞向基材过程中与分子的碰撞，减少气体中的活性分子和蒸发源材料间的化学反应（如氧化等），以及减少成膜过程中气体分子进入薄膜中成为杂质的量，从而提高膜层的致密度、纯度、沉积速率、和基材的附着力。对钢铁零件主要是镀制各种氧化物、氮化物、碳化物等膜，以获取高硬度、耐磨损、低摩擦因数、防腐蚀及装饰等效果。

CVD 技术因其工艺温度高，并有盐酸废气对真空系统腐蚀和对环境的污染，所以用于钢铁表面处理的较少，而 PVD 技术因工艺温度低、洁净无污染，其发展前景十分可观。在 PVD 技术中目前应用最多的方法有两种，其一是磁控溅射法，另一是冷阴极弧光离子镀。

（1）磁控溅射法　是利用低压气体辉光放电时，在阴极表面上发生的阴极溅射效应——阴极上的物质以分子或分子团形式向外飞溅。这些飞溅下来的物质沉积到工件表面就会形成一层涂层。因辉光放电行为受所加磁场的控制故称磁控溅射。如果在辉光放电的同时向真空镀膜室内通入某反应气体，则会与阴极溅射下来的物质形成化合物。这些化合物沉积到工件表面就会得到化合物涂层。例如，阴极为金属钛，反应气体是氮，在 200 ~ 300℃ 就可以在工件表面形成结合强度很高的 TiN 涂层。TiN 颜色酷似黄金，所以把镀 TiN 俗称为“仿金镀”“镀钛金”。TiN 不仅有金黄的颜色，而且有 2000HV 的高硬度及很低的摩擦因数和很高的耐蚀性、抗氧化性。刀具、冷作模具镀 TiN 不仅外观漂亮，而且使用寿命提高 2 ~ 10 倍，目前已广泛得到应用。

磁控溅射法工艺温度可以很低，50℃ 左右就可以镀 Al 膜。所以也广泛用于纸张、塑料、玻璃等材料表面上的各种装饰膜和功能膜。只要更换阴极靶的材料和反应气体，利用同一台设备就可以镀制不同物质的膜层，使用起来很方便。

（2）冷阴极弧光法　是利用在低压气体中冷阴极的弧光放电来蒸发阴极物质，并沉积到工件表面上或与反应气体形成化合物后再沉积到工件表面上，从而使工件表面镀得所需要的膜层。

冷阴极弧光离子镀，因为在每台设备上可以安装多个弧光离化源（阴极靶），每个阴极靶上都有放电弧斑在高速运动，所以也常称为多弧离子镀。多弧离子镀镀膜速度很快，镀 TiN 装饰膜（1μm）仅需 3 ~ 5min。在刀具、模具上镀 TiN（2 ~ 5μm）仅需 10 ~ 20min。这种方法还有一大特点是阴极靶材蒸发时没有熔池，因此阴极靶的放置不受方位限制。设备可以做得很大，适合镀制大型零件。如 6m 长的不锈钢管和 1. 22m × 3. 05m 不锈钢板，每炉可镀多件。

这种方法不足之处是蒸发下来的阴极物质颗粒较大，易出现“液滴”。这可以在设备结构和工艺参数上加以控制。

真空多弧离子镀也可以只需更换阴极靶材料和反应气体，在同一台设备上就可以镀制各种膜层。

以上几种表面处理技术，所得到的膜层表面粗糙度值低，优于工件原来表面。镀后直接就可以使用。

8.7.5 热浸镀

热浸镀是一种较为古老的表面处理方法，但至今仍不能被其他方法完全代替。工业上应用最多的是热浸镀锌，如线路金具、可锻铸铁管件、低碳钢丝（铅丝）的表面处理仍采用热浸镀锌。

热浸镀锌可在零件表面上得到较厚（0.2mm）的镀锌层。镀层很致密，极少针孔，不仅好看，还有良好的防大气腐蚀功能，有效防止钢铁表面生锈。

工艺路线是：打光——脱脂——酸洗——水洗——浸氯化铵水溶液——热浸锌——水爆（小件不用）。

热浸锌工艺：浸液是99%锌+1%铝的熔浴，浸镀温度是500~550℃，浸镀时间是5min（由工件大小决定）

8.7.6 热喷涂

热喷涂是指在普通钢铁零件表面通过氧乙炔焰或热等离子体技术涂覆一层较厚的特殊材料涂层，使零件表面获得耐磨、耐蚀、耐高温等性能。达到零件表面改性，提高使用寿命以及修复严重磨损零件的目的。

等离子喷涂是目前主导的热喷涂方法。它既可以在钢铁表面上喷涂合金、金属化合物，也可以喷涂某些非金属材料。

热等离子体通常都是通过气体电弧得到的。利用热等离子体的高温来加热零件和熔化喷涂用的粉末，使零件表面得到一层特殊的涂层。热喷涂通常都是在大气环境中完成的。涂层较厚，在毫米量级上，改变了零件的尺寸，涂层表面粗糙度值较大。喷涂后可以通过切削加工或磨削加工使热喷涂件达到所需尺寸和表面粗糙度。

热喷涂所用的粉末通常有三大类：陶瓷粉末，如Al_2O_3、Cr_2O_3、NiO、钛酸铝（$Al_2O_3 \cdot TiO_2$）、硅酸锆（$ZrO_2 \cdot SiO_2$）等；复合粉末，如镍包铝粉、镍包硼粉等；合金粉末，如镍基合金、钴基合金、铁基合金粉末等。

8.7.7 冰花镀

冬天，冻结在玻璃窗上的冰花，图案天成，乱中有序，很富自然美。市场上不少产品上若隐若现的图案，就酷似这种冰花。它可以用电镀的方法获得，镀锡薄钢板（俗称马口铁）上面的图纹就不乏这类冰花图案。冰花电镀可以说是古老镀锡工艺的新发展。

首先在零件上镀锡，然后将零件加热，使锡镀层融熔。最后，迅速在熔化的锡

镀层上淋涂冰冷的水滴。由于骤冷作用，锡镀层急剧凝固，重新结晶，就形成了不规则的雪花、菊花、杜鹃花等图案。用它制成各种产品，再涂上红、黄、蓝、白、黑、青、灰等颜色的透明涂料，于是就成为各色的冰花图案了。

8.7.8 镀黑

黑色镀层，一般可通过镀黑铬、黑镍或黑铑来实现。此外，采用电镀与化学处理相结合的方法，在电镀锌后用银盐进行处理，也可获得黑色镀层。照相机内可以涂以黑色无光漆作遮光之用。但是黑漆不耐磨，黑色镀层的出现，可以解决此问题。许多高级照相机的上盖与底盖，汽车上的仪表零件，往往都采用黑铬镀层。这种镀层除了具有良好的遮光和防腐蚀作用外，对 0.3 ~ 2.5μm 波长的太阳光还有很高的吸收率，因而用作太阳能选择吸收板的表面涂层，颇具前途。

至于黑镍镀层，它没有光泽，多应用于精密光学仪器的部件上。而镀锌经银盐处理所得的黑色钝化层，由于成本低，耐蚀性也较好，故常被用于高级伞骨的镀饰。

8.7.9 其他表面处理方法

通过化学处理镀层的方法，可以获得许多其他各种不同颜色的镀层。

例如，将镀锌层放入特殊染料溶液中浸渍，可得到蓝色、绿色、红色等各种色彩的镀层，将镀银或镍的零件放入特殊的硫化物液中浸渍，则可得到各种颜色，且随浸渍时间的增加而按金色、赤色、赤紫、蓝紫、蓝色的规律变化。

此外，在镀铜层上再镀上黑镍，或对铜镀层作化学处理，使其表面形成黑色的硫化物或氧化物薄膜，然后用抛光的方法部分地除去黑色的膜，露出铜质，就能获得古色古香、铜锈斑斓的仿古镀层了，用它装饰起来的仿古艺术品几乎可以以假乱真。

8.7.10 彩色涂层钢板

彩色涂层钢板是以冷轧或镀锌钢板（钢带）为基材，经表面处理后涂以各种保护、装饰涂层而成的产品。常用的涂层有无机涂层、有机涂层和复合涂层三大类。以有机涂层钢板发展最快，主要原因是有机涂层原料种类丰富、色彩鲜艳、制作工艺简单。有机涂料常采用聚氯乙烯、聚丙烯酸酯、醇酸树脂、聚酯、环氧树脂等。

彩色涂层钢板的基体钢板与涂层的结合方式有涂料涂覆法和薄膜层压法两种。涂覆法主要采用静电喷涂或空气喷涂。前者机械化程度高、涂料不飞逸、工作环境好、涂层均匀、附着力高、质量好、节约涂料，是应优先采用的方法。后者是利用压缩空气，将涂料吹散、雾化并附着在钢板表面。此方法适用范围广，设备简单，但喷涂过程中涂料飞逸、工作环境差、劳动强度高，而且一次喷涂膜层厚度有限，需多次

喷涂。层压法是用已成形和印花、压花的聚氯乙烯薄膜压贴在钢板上的一种方法，该种复合钢板也称为塑料复合钢板。图8-6为典型的彩色涂层钢板的结构示意图。

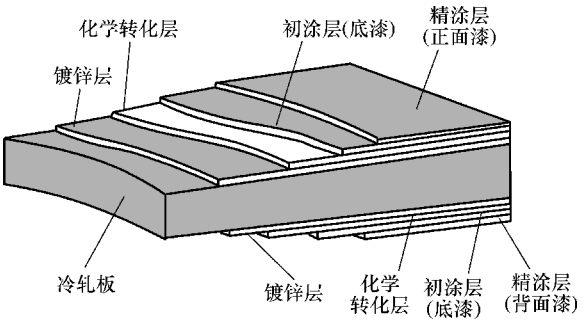


图8-6 彩色涂层钢板结构

彩色涂层钢板的最大特点是发挥了金属材料与有机材料各自的特性。不但具有较高的强度、刚性、良好的可加工性（可剪、切、弯、卷、钻），彩色涂层又赋予了钢板以红、绿、乳白、蓝、棕等多变的色泽和丰富的表面质感，且涂层耐腐蚀、耐湿热、耐低温。涂层附着力强，经二次机械加工，涂层也不破坏。

彩色涂层钢板主要应用于各类建筑物的外墙板、屋面板、室内的护壁板、吊顶板，还可以作为排气管道、通风管道和其他类似的有耐腐蚀要求的构件及设备，也常做家用电器的外壳。

8.7.11 彩色氧化铝

铝极易与空气中的氧发生作用，在表面生成一层氧化铝膜，把表面封包起来，使铝不再腐蚀。现在，铝表面的氧化膜，已广泛采用阳极氧化工艺加工形成。

阳极氧化工艺是两种不同的化学反应同时进行的结果：铝与阳极析出的氧作用生成 Al_2O_3，成为氧化膜（电化学反应）；电解液又将形成了的 Al_2O_3 不断溶解（化学反应）。只有当氧化膜的生长速度大于溶解速度时，才能得到一定厚度的氧化膜。

阳极氧化工艺，按电解质的不同，一般可分为硫酸法、铬酸法和草酸法三类。铝的瓷质阳极氧化工艺，是一种比较先进的工艺。所谓瓷质阳极氧化，就是在铬酸电解液中添加草酸、硼酸，经电解后在铝制品表面生成不透明的氧化膜，没有金属色泽，却具有瓷质的光彩，像瓷器一样。

用电解法表面处理生成的氧化膜，厚度一般为5～20μm，特殊需要的厚度可达300μm以内。它具有表面光滑、硬度高、耐磨等特点。此外，这层氧化膜还具有精细的微孔，孔体呈六角形，有强烈的吸附能力。利用氧化膜微孔的吸附能力，就可以用各种方法使铝制品染上各种色彩鲜艳的花纹图案。其中，常用的是染色消色法。

所谓染色消色法，就是在铝制品表面的氧化膜上染上一色花纹后，采用印漆方

法加以保护，其余部分的染色则用强酸或强碱配合成的消色液溶解掉，然后再染上另一色花纹，再作消色处理。如此反复进行，待需染印的花纹色调全部染毕，最后经封闭处理，即成所需的花纹图案。

但是，每染一色都进行一次消色处理，氧化膜势必被消色液削去一层。况且，有些染料很不容易消除，须用浓度较高的消色液才行。因此对膜层的腐蚀很厉害。经过这样几次染色几次消色后，氧化膜的厚度就大大减薄了，降低了膜层的质量。由于这个缘故，一般的花纹图案印染的色彩种数，都限制在单色、双色或三色之内。

为了适应铝制品彩印的需要和发展，又有一种“铝制品阳极氧化处理彩色印染”工艺（简称“彩色氧化铝”）出现。它也是利用氧化膜的微孔吸附特性来完成彩印要求的。不过，彩印时先把各种水溶性染料配成各种颜色的色浆（由色素和浆基两部分组成），并根据不同色素的特性及浆基的特性，添加活化剂、媒染剂、渗透剂、稳定剂等各种助剂，以确保各种色素能顺利地被氧化膜微孔吸附。然后，按花纹图案的要求，经分色丝网漏印，依次套印在经过阳极氧化处理后的氧化膜上。最后，再作封闭处理。

采用彩色氧化铝新工艺，铝制品表面的氧化膜层无须再消色，所以膜层仍能保持原来的厚度。采用这种新工艺，制品耐蚀性能增强，耐磨性相应提高，染印多色图案完全可按设计要求进行，可大大提高铝制品的装饰效果。在高级建筑材料、光学仪器、电子产品等方面得到应用。

利用铝的阳极氧化技术染色，可以以云雾状铝氧化工艺制成日用品外壳，色彩如云雾泼彩。以无机盐着色的铝氧化工艺制品，广泛使用于建筑材料上，例如门窗框架，公用电话亭框。

金属材料表面处理在现代工业中日趋重要，应用面越来越广。

第9章　粘　合　剂

在工程上，连接各种材料的方法除焊接、铆接、螺栓连接之外，还有一种连接工艺——粘接。它是借助于一种物质在固体表面产生的粘合力将材料牢固地连接在一起的方法。用以产生粘合力的物质称为粘合剂，被粘接的材料称为被粘物。

粘接技术和粘合剂很早就为人们所利用。但是，早期使用的粘合剂都来源于天然的动、植物胶液，它们的性能不够理想，应用范围受到很大限制。从20世纪50年代以来，随着高分子合成工业的发展，合成粘合剂作为一种新材料受到人们的重视，在各个工业部门得到广泛的应用。

粘接技术和传统的连接方法（如焊接、铆接）相比，具有如下优点：

（1）粘接接头应力分布均匀　焊接容易引起焊件变形和焊缝附近金相组织的改变，以及热应力的出现；铆接和螺栓连接都需钻孔，不可避免会造成应力集中；利用粘合剂粘接其应力能够比较均匀地分布在整个粘接面上，从而可以大大提高构件的疲劳寿命。

（2）可以连接各种材料　随着各种优异性能粘合剂的出现，粘接已不受被粘物材料性质的限制，无论是金属之间，金属与非金属之间，非金属之间都能获得良好的连接。这是其他连接方法所不及的。例如玻璃、陶瓷等脆性材料，既不能焊接，又不便于铆接，只有粘接最为简便而牢固。

（3）接头平整光滑　粘接的接头比焊接和铆接都平整光滑。它不仅外表美观、变形小，而且还可以大大减轻结构重量。据统计，用粘接代替铆接，可以减轻飞机制件重量25%～30%。这对于宇航和高速运转的机械具有十分重要的意义。

（4）粘接工艺简单　粘接所用的设备简单、操作方便，工艺温度低（能在室温下进行），便于推广。

粘接也存在着一些问题：

（1）强度　由于粘接接头的承载能力与粘接面积、接头形式等工艺因素有很大的依赖关系，目前对金属材料的粘接强度一般还不能完全达到母材的强度。特别是在粘接面积较小、接头承受到剥离力时粘接强度较低。

（2）使用温度　合成粘合剂的耐热性一般都不太高。大多数有机粘合剂的使用温度在80℃以下，少数品种可在300～900℃范围内使用；无机粘合剂的温度尚可再高一些，但总不及焊接和铆接，且有接头性能脆的缺点。

（3）寿命　粘接接头在长期工作过程中，由于粘合剂的老化将使接头强度下降，故使用寿命受到限制。

此外，粘接质量还没有特别可靠的检验和控制方法。

9.1 粘合剂的组成与分类

9.1.1 组成

传统的粘合剂多由单一组分的天然物质，或者由天然物质加水、油等成分组成。其成分很简单。但在现在，由于被粘合材料的品种繁多，性质也各不相同，对粘合强度等方面的要求越来越高，所以目前所用粘合剂的组成往往比较复杂。

1. 基料

基料是构成粘合剂主要而必须的成分。它对粘合剂的性能（如粘合强度、耐热性、韧性、耐老化等）起重要作用。合成粘合剂中的基料通常由一种或几种高聚物组成。常用的有酚醛树脂、环氧树脂、聚酯树脂、聚氨酯树脂、聚乙烯醇缩醛树脂、聚酰胺树脂以及丁腈橡胶、氯丁橡胶、聚硫橡胶等。

2. 固化剂

固化剂的作用和热固性塑料中的固化剂完全一样，使树脂从线型结构转变成网状或体型结构，从而使粘合剂固化。固化剂的种类和用量直接影响粘合剂的使用性质和工艺性能。

3. 增塑剂和增韧剂

它们能改善粘合剂的塑性和韧性，提高粘接接头抗剥离、抗冲击能力以及耐寒性等。根据不同类型的基料，所用增塑剂和增韧剂也不同。常用的有高沸点的低分子有机液体（如邻苯二甲酸二丁酯、磷酸三甲苯酯等），热塑性树脂（如聚酰胺树脂、聚乙烯醇缩醛树脂等）及合成橡胶（如丁腈橡胶，聚硫橡胶等）。

增塑剂的用量不宜多，一般为 10% ~20%，否则会使粘合剂的强度、弹性模量、抗蠕变性能、耐热性能等下降。

4. 稀释剂

稀释剂能降低粘合剂的粘度，增加粘合剂对被粘物表面的浸润力，并有利于施涂。凡能与粘合剂混溶的溶剂，或能参与粘合剂固化反应的各种低粘度化合物均可作为稀释剂。

5. 填料

填料的加入能使粘接接头提高粘接强度、增加表面硬度、提高耐热性、降低热胀系数和收缩率、增大粘度和降低成本。采用填料还能使接头具有特殊性能，如导电性、导磁性等。通常使用的填料有金属粉末、玻璃、石棉等非金属纤维及其织物。

6. 增粘剂

增粘剂可以提高粘合剂的粘附能力和初粘力，也可以提高粘合剂的表观粘度和耐老化性能。松香及其衍生物、萜烯及很多合成树脂都可用作增粘剂。

7. 抗氧剂

抗氧剂的作用是抑制或减缓粘合剂及胶膜老化，主要用于以合成聚合物为粘合物质的粘合剂。

8. 防腐剂

防腐剂的作用是防止某些以天然有机物质如淀粉及动物胶等作粘合物质的粘合剂受到细菌作用而腐化。常用的防腐剂有甲醛、苯酚等。

9. 消泡剂

有些粘合剂在制造和使用过程中产生气泡，这样在涂布时会因气泡的存在而使胶膜变得不连续而影响粘合强度，在此时可加入消泡剂使气泡消失。可使用的消泡剂有高级醇类及脂肪酸甘油酯等。

10. 其他

根据要求，在粘合剂中还可加入其他助剂，使粘合剂的性能更加完善。

需要指出的是，并非每种粘合剂都含有上述所有成分。粘合剂的种类和被粘物的性质不同，粘合剂的成分也不尽相同，但无论何种粘合剂，粘合物质总是必不可少的成分。

9.1.2 分类

粘合剂的品种繁多，组成各异，目前尚无统一的分类方法。下面是常用的两种分类：按粘合剂基料的化学成分分类可以分为有机粘合剂和无机粘合剂两大类，其中每一大类又可进行如下细分：

1. 按主要粘合剂物质分类

- 粘合剂
  - 有机物
    - 天然
      - 葡萄糖衍生物 – 淀粉、糊精等
      - 氨基酸衍生物 – 干酪素、骨胶等
      - 天然树脂 – 松香、树胶等
      - 天然橡胶 – 橡胶胶乳等
    - 合成
      - 树脂型
        - 热塑性 – 聚醋酸乙烯、聚乙烯醇、聚乙烯醇缩醛类
          聚丙烯酸类、聚酰胺类、聚乙烯等
        - 热固性 – 脲醛树脂、酚醛树脂
          聚氨酯、环氧树脂等
      - 橡胶型 – 氯丁橡胶、丁腈橡胶等
      - 复合型 – 酚醛 – 氯丁橡胶等
  - 无机物 – 硅酸盐类 – 硅酸钠

2. 按固化方式分类

粘合剂
- 挥发固化型 – 淀粉、动植物胶、热塑性树脂等
- 热熔型 – 乙烯 – 醋酸乙烯共聚物、聚丙烯酸酯、蜡类等
- 反应固化型 – 环氧树脂、聚氨酯等

3. 按粘合剂的外观状态分类

溶液型：水溶液型 – 聚乙烯醇；有机溶剂型 – 热塑性树脂。

乳液型：聚醋酸乙烯。

固态型：乙烯 – 醋酸乙烯共聚物。

其他：糊膏状、淤浆状。

4. 按粘合剂的使用方法分类

水活化型：使用时要加一定量的水使其活化才具备粘合能力 – 聚乙烯醇等。

溶剂活化型：使用时加溶剂使粘合剂活化形成牢固的粘合 – 涂布酚醛等。

压敏型：在粘合时必须加一点压力才能形成牢固的粘合 – 橡胶类、丙烯酸酯类。

热熔型：使用时加热使熔化，涂布在被粘物表面，冷却后即固化粘合牢固 – EVA 等。

5. 按粘合剂的主要用途分类

可以分为非结构胶、结构胶、密封胶、导电胶、耐高温胶、耐低温胶、水下胶、点焊胶、医用胶、应变片胶、压敏胶等。

9.2 粘接机理

9.2.1 产生粘合的基本条件

1. 粘合剂必须有良好的流动性

改善流动性的方法：①加入溶剂或稀释剂；②加热（对热熔粘合剂）；③加压。

2. 粘合剂必须能充分浸润被粘物表面

从物体的表面张力来看，通常表面张力小的物质能够很好地润湿表面张力大的物质，反之则不行。例如，油能很好地铺展在水或冰的表面，而水却不能铺展在油或带油物体的表面。物质的表面张力见表 9-1。

从表 9-1 可看出，金属及无机物的表面张力远大于粘合剂的表面张力，如果金属及无机物的表面是干净的，则很容易被粘合剂润湿从而形成良好的粘合条件。也正因为如此，它们也容易被表面张力小的物质如油等污染。因此，对这些材料在粘接前应仔细进行表面处理。

表 9-1 物质的表面张力

物质名称	温度/℃	表面张力/(dyn/cm)	物质名称	温度/℃	表面张力/(dyn/cm)
汞	20	484	酚醛树脂粘合剂	20	78
铅	350	442	尿醛粘合剂	20	71
锌	700	538	间苯二酚－甲醛粘合剂	20	48
铝	700	750	环氧树脂粘合剂	20	47
银	1000	920	聚醋酸乙烯乳液	20	38
金	1120	1128	硝基胶	20	26
铜	1120	1270	酪朊胶	20	47
铁	1570	1835	聚甲基丙烯酸全氟辛酯	20	10.6
镍	1550	1925	聚全氟丙烯	20	16.2
氧化亚铁	1420	585	聚四氟乙烯	20	18.5
氧化铝	2080	700	聚氟乙烯	20	28
钠钾硅酸盐玻璃	1000	225～290	聚氯乙烯	20	39
水	20	72.7	聚偏二氯乙烯	20	40
乙醇	20	22.75	聚甲基硅氧烷	20	20.1
丙酮	20	23.7	聚乙烯	20	31
苯	20	28.9	聚苯乙烯	20	33
甲苯	20	28.4	聚乙烯醇	20	37
己烷	20	18.4	聚甲基丙烯酸甲酯	20	39
苯酚	20	40.9	聚对苯二甲酸乙二醇酯	20	43
醋酸乙酯	20	23.9	尼龙 66	20	46
氯仿	20	27.1	纤维素	20	45

由于塑料的表面张力与粘合剂的表面张力很接近，故在粘接前须经过表面处理以提高表面张力方可，氟塑料的表面张力最小，故属难粘材料。

在粘合剂中可加入适量的活化剂以降低其表面张力，提高润湿能力。

3. 粘合剂与被粘物之间必须有足够的作用力

为了解释作用力的产生，解释粘合机理，人们提出了几种粘合理论。

9.2.2 粘合理论

粘合理论的发展，从 1805 年提出浸润角的热力学概念算起，才 200 多年。1869 年提出的平衡时最大热力学粘合功与表面能的关系式，已成为以表面能为基础的粘合吸附理论的根据。1940 年，合成树脂与生胶并用的粘合剂，在粘合铝合金中成功地应用于飞机结构中，它促使粘合各种理论的相继提出。1948 年提出电

子理论，1949～1953 年提出扩散理论，1961 年提出弱界层理论，1961 年整理出系统的粘合剂流变学，对粘合界面间生成化学键的研究日益重视，强调了化学反应的重要性，1974 年将上述几个主要理论综合后，提出了粘合分子理论，1976 年证实了机械互锁或钩联对某些粘合系统仍有指导意义，1978 年有关表面能为基础的吸附理论、电化学见解，扩散理论的实验证明，以及力学研究等都在继续发展。

可见，对不同材料的粘合这样复杂综合的系统，要想用一个统一万能的理论来解释各种特殊情况，是不合乎事物变化运动规律的。

粘接机理是对粘合强度的形成及其本质的理论分析。许多科学工作者从不同的实验条件出发，提出了不少理论，如吸附理论、扩散理论、静电理论、化学键理论等，这些理论都从不同角度解释了一些粘接现象。然而，到目前为止，对粘接机理的研究尚不完善，还有待不断总结和提高。

1. 粘合力与粘接强度

粘接接头是一个多相体系，由三个均匀相（粘合剂基体和两个被粘物基体）和两个界面区构成。受力后粘接接头的破坏可能发生在三个部位：被粘物本身、胶层本身、胶层与被胶粘物的界面，前两者称为内聚破坏，后者称为粘附破坏。对于粘接技术来说，主要讨论的对象是胶层的内聚破坏和粘附破坏。

粘合力是由粘合剂与被粘材料之间的粘附力和胶层本身的内聚力组成，胶层的内聚力是粘合剂本身分子间的作用力，它的大小取决于粘合剂的组成；粘附力是粘合剂与被粘材料之间的作用力，它的大小不仅与粘合剂有关，还与被粘材料的性质和表面状态有关。承载时，当内聚力小于粘附力时，发生内聚破坏，此时在两个粘接面上都附有一层表面粗糙的胶层；当内聚力大于粘附力时，发生粘附破坏，此时被粘材料的一个粘接面上没有胶，另一个粘接面上附有一层胶层，并带有表面打磨的痕迹。

粘合力是决定胶结强度的主要因素。但是，胶结强度除决定于粘合力之外，还取决于接头形式、受力情况、测试方法等多种因素。

2. 吸附理论

这是现今较为普遍的理论。吸附理论认为：粘合作用是由粘合剂和被粘物分子在界面上接触并产生次价键力（范德华力和氢键）所引起的。

固体表面是由起伏不平的峰谷组成，即使是精加工的研磨镜面，其粗糙度也在 250Å 以上。而分子之间形成次价键力的距离在 10Å 以下。因此不能在整个平面上达到分子间接触，固体表面间就不可能连接。但是任何固体表面都具有吸附性。这是因为固体内部原子或分子的平衡不能在表面层建立，表面层的原子或分子的力场必然扩展到固体表面以外的空间，使外界进入该力场作用范围的粒子被吸附。因此固体表面通常都会吸附存在于环境中的各种气体、油污、尘埃等。如果我们选一种具有良好流动性、渗透性，并能解吸表面吸附气体的粘合剂，把它涂于被粘表面并压合时，两固体表面的点接触将被固体—液体—固体的面接触所取代。粘合剂不仅

排除间隙的空气并渗透到表面的微孔中，而且还能解吸表面吸附的气体，从而使粘合剂与固体表面分子间达到分子间作用力的距离，产生较强的次价键力。当粘合剂借助于物理或化学作用由液态转化成坚韧的固体之后，便能产生一定的粘接强度。

要使粘合剂分子扩散至被粘物表面达到分子间接触，重要的条件是粘合剂必须能润湿被粘表面。因为，如果粘合剂对被粘表面润湿不良便会阻碍粘合剂与被粘物分子间的接触，易使空气存留于界面上形成气泡，从而导致粘接强度下降。润湿性能的好与差常用接触角（或润湿角）来表示。接触角是通过液滴三相（气、固、液）点作液滴曲面切线，切线与液滴接触面一侧的夹角即接触角 θ 有关。接触角 θ 越大，润湿性能越差，一般接触角 θ 应小于 90°方能满足粘接要求。液体与固体之间的接触角如图 9-1 所示。

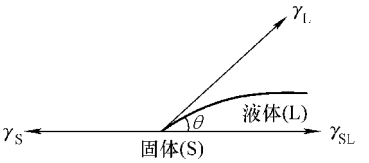


图 9-1 液体与固体之间的接触角

接触角 θ 的大小与表面能（或表面张力）有关：粘合剂的表面能比被粘物表面能越低，润湿越容易，接触角 θ 越小。如有机粘合剂的表面能远远低于金属，因此一般都能良好地润湿金属表面。反之，粘合剂表面能若大于被粘物表面能时，常会导致润湿不良。例如，环氧粘合剂对金属、陶瓷等具有优异的粘合力，但对聚乙烯、聚丙烯、聚四氟乙烯这些低表面能的塑料往往润湿困难，粘接效果差。

吸附理论还认为：粘附力是粘合剂与被粘物两种分子之间的相互作用力，这种作用力主要是范德华力和氢键，有时也有化学键力。在许多情况下，粘附力主要表现为极性键力。粘合剂分子的极性小，它与固体接触时，界面间的极性键力必然小，即粘附力必然小。如果粘合剂分子的极性大，则能形成较多和较强的氢键，这样粘附力也必然大。所以要提高粘接强度总希望粘合剂的极性大些。

3. 化学键理论

化学键理论认为：某些粘合剂与被粘物表面能够形成化学键。化学键是分子内原子之间的作用力，它比分子之间的作用力要大一两个数量级，因此具有较高的粘结强度。

实验证明，聚氨酯胶、酚醛树脂胶、环氧胶等与某些金属表面确实生成了化学键。近年来广泛应用的硅烷偶联剂就是基于这一理论研制成功的。这种偶联剂既可以和粘合剂起化学反应，又能与被粘物分子起化学反应形成牢固的化学键，因此使用偶联剂之后可以大大提高胶结强度。

4. 其他理论

除吸附理论和化学键理论外，尚有扩散理论、静电理论和机械理论。

扩散理论认为：物质的分子始终处于运动之中，由于粘合剂中的高分子链具有柔顺性，在粘接过程中粘合剂分子与被粘物分子相互产生扩散作用。在一般情况下这种扩散作用进行得缓慢，因而粘合力小。然而在粘合具有相溶性的高聚物时，粘合剂涂于能被它溶解或溶胀的高聚物表面，界面上将逐渐形成粘合剂与被粘物相互

“交织”的扩散层，其粘合强度随时间和温度的增加而增至最大值。热塑性塑料的溶剂粘结可看作是高聚物分子相互扩散引起粘合的效果。

静电理论认为：由于粘合剂和被粘物具有不同的电子亲合力，当它们接触时就会在界面上产生接触电动势，形成双电层，类似一个电容器，界面两侧的粘合剂和被粘物表面相当于电容器的两个极板。当从被粘物表面剥离胶膜时，产生的电位差随极板间距离的增加而增大，至一定值便开始放电。静电理论能解释胶层剥离时的放电和发光现象。

机械理论把粘合现象看做是粘合剂与被粘物之间的纯机械咬合或者镶嵌作用。

机械作用的存在已为人们所承认。但大量实践证明，机械作用不是产生粘合力的主要因素，因为它未能反应表面化学性能的改变对粘接强度的影响。

以上各种理论对阐述粘合机理都有其正确的一面，但都解释得不十分完善。尤其是实际使用的粘合剂其组成都比较复杂，难以用某一理论进行圆满的解释，因此对具体问题要具体分析，用各种理论来解释并相互补充。

5. 结论

1）无论哪种有关粘接机理的解释都不能适合所有的情况，没有一种解释是万能的，不可能有一种关于粘接的普遍的解释。在某种特定条件下，某种机理起主要作用。

2）各种粘接机理相结合，可加深对粘接现象的理解。一个粘接接头从各种起源的结合达到它的最大强度。吸附作用包括扩散力，酸/碱、电子给予体/电子接受体相互作用力和化学键，所有这些都可以描绘为静电作用，机械渗透依靠外形、流动和扩散，就两种聚合物而言，依靠链段的相互扩散。

9.2.3 影响粘合强度的因素

1. 构成粘合剂的高分子化合物相对分子质量及结构的影响

1）相对分子质量的影响：相对分子质量过小、过大都不好，应适中。

2）极性的影响：一般地，符合相似相溶的经验规则，但也有例外：例如用丁腈橡胶粘合剂粘合玻璃纸（赛璐玢）时，当丁腈橡胶中丙烯腈基含量增加时，虽然极性增大，但与极性的玻璃纸粘合性能反而降低。这一反常现象可能是由于丙烯腈含量增加使高分子链的刚性增加了，因此，随着极性的增加，粘合剂在玻璃纸中的渗透能力减弱，使粘合能力下降。

3）位阻的影响：过大，粘合性能降低，过小，粘合剂抗耐性差。应适当平衡一下。

2. 粘合面内应力的影响

粘合面内应力对粘合强度有较大的影响。由于粘合剂的相变化及温度、组成、时间等的变化引起粘合剂层尺寸和被粘物尺寸的变化而产生内应力。内应力的大小与粘合剂及被粘物的延伸率、热胀系数、粘合剂层厚度及表面状态等有关。

（1）相变化 为使粘合剂充分浸润被粘物，粘合时粘合剂通常为液体，为了达到一定粘合强度，就要通过溶剂或水的蒸发、凝胶化、冷却、消除外压力（指压敏粘合剂）等物理变化及聚合、缩合、硫化、氧化等化学变化使粘合剂固化。在这些变化中常常有体积收缩，因而产生内应力，降低了粘合强度。所以要使相变化引起的内应力最小，希望所采用的粘合剂在流变状态下既能完成大部分体积收缩，而在固化时只有小部分收缩。

（2）热胀系数 如果粘合剂与被粘物的膨胀系数差别比较大，在温度发生变化时，也会引起不同的体积收缩，产生应力。所以应尽量选择与被粘物热胀系数接近的粘合剂。例如用有机粘合剂粘合无机材料时，可以通过加入填料，以缩小与无机被粘物热胀系数的差别，减小内应力。

在大面积粘合的情况下，有时采用点条式涂胶，也是为了减小内应力。

（3）组成的变化 粘合剂与被粘物的含水量都会随空气的相对湿度变化而变化。对水敏感的材料会因湿度变化而产生内应力。

粘合剂中可溶性组分的迁移、溶剂及增塑剂的挥发等都会使组成发生变化，使被粘物收缩并产生应力。此外，热固性粘合剂的固化、橡胶粘合剂的硫化等，也有组成的变化和体积收缩，因而也会影响粘合强度。

3. 被粘物性质对粘合强度的影响

被粘物的化学组成、物理性质及表面情况等对粘合强度都有较大影响。一般来说，粘接极性材料要选用极性粘合剂；粘合非极性材料要选用非极性粘合剂。这只是一般规律，不同材质的材料有不同性质，在各自的粘合中要区别对待。

例如热固性塑料不能用热焊或溶剂粘接，只能用粘合剂粘接。热塑性塑料除了可用粘合剂粘合外，还可用热焊及选用适当溶剂粘接。但聚乙烯、聚丙烯、聚四氟乙烯等非极性塑料，又不能用普通塑料用粘合剂粘接，常常要在粘合前用电火花等处理其表面。

当被粘合材料为金属时，一般随金属原子体积的增大，粘合强度下降。

9.3 常用粘合剂

9.3.1 葡萄糖衍生物粘合剂

葡萄糖衍生物粘合剂主要指以淀粉、可溶性淀粉、糊精等为主要粘合物质制成的粘合剂。其中用量最大的是主要由使用者自制的淀粉粘合剂和糊精粘合剂。它们在纸盒、纸箱的封口，制袋等纸包装和纸容器的粘合中占有很大比例。特别是瓦楞纸板的生产，几乎都使用淀粉粘合剂。

1. 淀粉粘合剂

淀粉的种类很多，在制备粘合剂中有工业意义的主要有玉米淀粉、小麦淀粉、

木薯淀粉、番薯淀粉、马铃薯淀粉和大米淀粉等。

淀粉的主要成分为葡萄糖聚合物，其中含直链淀粉和支链淀粉两种碳水化合物。前者可溶于热水。

淀粉颗粒不溶于冷水，在热水中当达到一定温度（即糊化温度）时，淀粉颗粒破裂而糊化，成为具有粘性的半透明液体。

当淀粉的来源、产地不同时，淀粉的物理化学性质也随之改变。不同品种的淀粉，其颗粒形状、大小及糊化温度等均不同。

淀粉分子中含有葡萄糖甙链和容易发生反应的羟基，所以淀粉能与多种物质发生化学反应。淀粉可以被无机酸在葡萄糖甙末端水解。在氢氧化钠存在时，淀粉悬浮液可与次氯酸钠发生反应，淀粉被氧化。还可以被过氧化氢等氧化，适当控制氧化深度可制得氧化淀粉。用这种氧化淀粉可制得凝胶温度低、粘合强度高的粘合剂。

淀粉极易吸潮，吸潮后容易霉变。淀粉中的蛋白质对配制粘合剂极为有害，蛋白质含量高时，制得的粘合剂会起泡沫，易发生凝胶，一般应控制蛋白质含量在0.5%以下。

2. 糊精粘合剂

糊精是淀粉的不完全水解产物，是白色或黄色无定形粉末，能溶于冷水。其制法可用直接煅烧法，将干燥淀粉在190～230℃下加热，即可制成。还可以将浓硝酸200ml和浓盐酸300ml，先用10L水将酸稀释，混合均匀后加入到100kg干燥淀粉中去，混合后在50℃下先大致干燥，再在110～114℃下加热1h左右，使酸挥发即制得糊精。

用糊精制得的粘合剂固体含量高，粘度稳定，流动性好。可满足机械化上胶生产线的要求。

9.3.2 热熔型粘合剂

热熔型粘合剂简称热熔粘合剂或热熔胶，是一种不含溶剂，以热塑性高分子聚合物为基料的固体粘合剂。加热使其熔融，并涂布于被粘物表面，然后迅速将被粘物贴合，冷却后粘合剂即固化形成一定强度的粘合。

热熔型粘合剂的优点是不含溶剂，固化迅速，粘合力较强，对操作人员无毒、无环境污染，在常温下是固态，保管运输方便，粘合工艺简单，对渗透性不好的材料也可较方便地粘合，胶膜耐化学腐蚀、耐酸碱、耐水性好。缺点是耐热性较差，使用时粘度较高，难以做到均匀薄层涂布。

热熔型粘合剂可用于复合包装材料的层合；塑料袋的搭接、封合；纸盒的接缝和封合；标签粘贴；书刊的无线装订等。

9.3.3 溶剂型粘合剂

溶剂型粘合剂是包装中比较常用的一类粘合剂。将高分子聚合物等粘合物质用

适当的溶剂溶解，即可制得溶剂型粘合剂。它们通常为聚合物的溶液。所用的溶剂可以是有机溶剂，也可以是水。

溶剂型粘合剂比乳液型粘合剂或热熔型粘合剂有其特殊的优点，即在低活性表面，特别是在烯烃类的塑料表面润湿性较好，粘合剂内的有机溶剂起到渗透及溶胀部分表面的作用。有机溶剂的粘合剂比乳液型粘合剂要干得快，并且不同于热熔型粘合剂，可使用于耐热性低的基材上。多数聚合物是在有机溶剂中溶解直接使用，而不能在水中制成分散体或熔化成热熔型粘合剂。聚合物的有机溶剂溶液最能保留聚合物本身的性能，它有更好的渗透性，能渗入并粘结很多基材，形成适宜的胶膜，达到既透明而又无针孔的效果。

溶剂型粘合剂的缺点是硬度较低，有机溶剂多易燃、易爆，如果没有很好的通风和溶剂回收装置，会对环境产生污染，且溶剂成本高，如干燥不彻底，溶剂污染内装物，又产生异味。

虽然它有上述缺点，但在有些方面的应用还不能被其他类型粘合剂完全取代。但在应用时要注意通风和溶剂的回收。

在食品包装方面，溶剂型粘合剂主要用于软包装的复合薄膜干法复合，将塑料薄膜与塑料薄膜及铝箔、纸张等复合在一起，制成蒸煮袋、外包装袋等。但由于残留的有机溶剂给食品带来怪味，近年来倾向于采用高固体含量的或热熔型（即无溶剂）粘合剂来进行复合。溶剂型粘合剂的其他大量应用是作为标签粘贴及压敏粘合剂。

9.3.4 乳液型粘合剂

乳液是聚合物的微粒在水中的分散体。颗粒直径一般为0.1～2μm，它的周围有乳化剂保护，形成了均匀、稳定的体系。

乳液粘合剂以水为分散介质，成本较低，无毒，色浅，有良好的稳定性和作业适性。而且聚合物乳液树脂的相对分子质量可以很高，因此粘合剂膜的强度较好。乳液粘合剂不用加热或加固化剂就能较快地固化。乳液粘合剂的最大缺点是耐水性不佳，蠕变性较大，这两个缺点可以通过提高聚合物的相对分子质量得到一定改善。另外，为了降低蠕变性还可以进行适度交联。

在工业中用得较多的乳液粘合剂主要有聚醋酸乙烯乳液粘合剂以及乙烯－醋酸乙烯共聚乳液粘合剂。

1. 聚醋酸乙烯乳液粘合剂

大部分聚醋酸乙烯乳液粘合剂是以乳液的形式来使用的，其特点是：①乳液聚合物的相对分子质量可以很高，机械强度好。②与其他同浓度乳液粘合剂相比，粘度低，便于机械施涂，使用方便。③以水为分散介质，成本低，无毒，不燃。

聚醋酸乙烯乳液粘合剂的聚合度约为数千，乳液颗粒直径为0.1～2μm，树脂含量可在30%～60%之间调节，粘度可调。通常高粘度乳液用辊式涂布器涂胶；

中粘度乳液用毛刷或喷嘴式挤出器涂胶；低粘度乳液用喷雾式涂布器涂胶。在乳液中加少量水，可使其粘度急剧下降。聚醋酸乙烯乳液粘合剂在应用上还有如下特点：

1）固化快，对于牛皮纸粘合，约 5 ~ 10s 即可固化，使用喷雾涂布时，由于涂布量少而均匀，约 3 ~ 5s 即可粘接。

2）粘合力强，连续长期使用仍能保证粘合牢度。

3）能用于纸和金属箔等非多孔性材料之间的粘合。

4）不易产生霉菌。

5）加入少量溶剂（二甲苯等）就能很好地与涂布聚乙烯或石蜡的纸粘合。

2. 乙烯 – 醋酸乙烯共聚物乳液粘合剂

乙烯 – 醋酸乙烯共聚物乳液粘合剂简称 EVA 乳液粘合剂。在组成配方上 EVA 乳液粘合剂与聚醋酸乙烯乳液粘合剂大同小异。它们之间的最大区别是 EVA 乳液中含有 10% ~ 30% 的共聚乙烯，使聚合物的玻璃化温度有所降低，大致不大于 10℃。与对应的聚醋酸乙烯乳液粘合剂相比较，EVA 乳液粘合剂有如下几点不同：

1）对于难于粘结的低表面能的基材，EVA 乳液粘合剂的粘合力有所提高。普通水基粘合剂不能粘结的塑料薄膜，用 EVA 乳液粘合剂能良好粘结。因此可用于聚氯乙烯薄膜与其他材料的粘结。

2）初粘性好，能快速粘接。在纸袋制造中能满足 1min 制袋 1000 个的要求。对于高速生产线，快速粘接的特点显得格外重要。

3）耐水性、耐碱性良好。

9.3.5 环氧粘合剂

分子结构中含有两个以上环氧基$\left(\begin{array}{c}-\mathrm{CH}-\mathrm{CH}- \\ \diagdown\ \diagup \\ \quad\mathrm{O}\quad\end{array}\right)$的线型高分子化合物称为环氧树脂。以环氧树脂为基料的粘合剂称为环氧粘合剂。

1. 基料 – 环氧树脂

环氧树脂的种类很多，但作为粘合剂应用最广的是双酚 A 型环氧树脂。

双酚 A 型环氧树脂有以下特点：①大分子中有脂肪族羟基、醚键、环氧基等极性基团存在，与被粘物表面易产生较强的结合力，因此对许多材料，如金属、陶瓷、玻璃、塑料、木材、橡胶等都具有较强的粘接能力。②收缩率小。它固化时不产生低分子副产物，收缩率一般低于 2%，如加适当填料收缩率还可降低。③原料易得、成本较低。④固化后脆性较大、抗冲击强度低、耐热性不高。⑤耐自然老化性差，特别是不耐紫外线照射。

为了弥补双酚 A 型环氧树脂的不足，近年来研制了不少新的环氧树脂品种，如非双酚 A 型环氧树脂、脂环族环氧树脂以及其他类型的环氧树脂，大大改善了环氧树脂的性能。

2. 固化剂

环氧树脂本身是线型聚合物，只有通过一定的化学反应使其固化成体型交联结构，其优异的物理力学性能才能充分发挥出来。

各类固化剂的特点如下：

脂肪族胺类固化剂（如乙二胺、二乙烯三胺）的固化速度快、放热量大，使用期短，有一定的毒性，固化后胶层的机械强度和耐热性比其他固化剂低，脆性也较大。但它的优点是粘度低、使用方便、可以室温固化。

芳香族胺类固化剂（如间苯二胺）固化时一般需要在较高的温度下进行，使用期长、固化后树脂的耐热性较好。

咪唑类固化剂（如2－乙基－4甲基咪唑）是一类含氮的杂环化合物。由于它的分子是环状结构，固化产物的耐热性较一般胺类固化的要高。它的价格虽然较高，但用量较少、无毒（或低毒）、使用方便。

酸酐类固化剂（如顺丁烯二酸酐）的固化反应速度比胺类固化剂小得多，通常要在较高的温度下固化。固化后的机械强度、耐热性均比脂肪胺类高。这是因为它在固化时除与环氧基反应交联外，还与环氧树脂大分子中的羟基反应交联，因而交联密度高，性能也较脆。此外，它的毒性比胺类小，使用期长。它的缺点是固化产物中含有酯键，因而易受碱的侵蚀。

除上述各类固化剂外，还有高聚物固化剂及潜伏性固化剂。高聚物固化剂常用低相对分子质量聚酰胺，它既可以起固化作用，又能起增韧的作用。聚酰胺内游离胺基能与环氧基交联固化，而大分子中脂肪链的存在，使环氧树脂分子内刚性苯环的距离加大，使链有较大的自由度，增加了树脂的韧性。此外，高聚物不易挥发、无毒、使用方便。

潜伏性固化剂则是以使用期和贮存期长为特点。它在常温下不起固化作用，它与环氧树脂配和后能以单组分形式在常温下贮存数月而不固化。在使用时加热至一定温度便迅速显示出固化特性。这类固化剂品种很多，胺类固化剂中的双氰胺也可以作为潜伏性固化剂使用。

3. 其他添加剂

单纯的环氧树脂固化后性能较脆，为提高胶层的抗冲击性能常要加入增韧剂。增韧剂有两类，一类叫活性增韧剂，它参与固化反应，前述的高聚物固化剂即属此类。这一类增韧剂常用的有低聚合度的聚酰胺、聚硫橡胶、丁腈橡胶等。另一类叫非活性增韧剂，它不参与固化反应，但能与环氧树脂混溶，降低了次价力，固化后交联密度降低，从而降低了脆性。这类增韧剂常用的有邻苯二甲酸二丁酯（DBP），邻苯二甲酸二辛酯（DOP）等，它们的用量常为环氧树脂的10%～20%。

为了降低胶层的收缩率和提高耐热性、耐冲击性等要求，可以选用不同的填料。填料用量及作用见表9-2。

表 9-2　填料用量及作用

填料名称	用　量	主要作用
石棉纤维、玻璃纤维	20～50	提高抗冲击性和耐热性
石英粉、瓷粉	40～200	提高表面硬度
Al_2O_3 粉、SiO_2 粉	30～100	提高粘附性和耐热性
各种金属粉	50～300	提高导热、导电性能，降低热胀系数和收缩率
二硫化钼、石墨粉	30～80	提高耐磨性和润滑性
硫酸钙、陶土	25～100	提高粘度、降低收缩率和成本
水泥、生石灰、滑石粉		同上

注：用量指 100 重量份树脂用填料重量份数。

此外，其他添加剂中还有稀释剂，如丙酮、甲苯等，促进固化反应的促进剂，如三乙胺、DMP－10 等。

4. 常用环氧粘合剂

实际使用的环氧粘合剂，由于要满足各种不同的需要，因此配方很多，常见的有：

（1）环氧通用胶　这类胶在室温和接触压力下即可固化，使用方便。一般市售商品都是双组分包装，使用时需现用现配。固化条件：室温 48h 或 80℃，2～3h。

主要性能：粘接铝合金剪切强度，－55℃为 20MPa，室温为 18MPa，80℃为 10MPa。

环氧通用胶有粘接力强、使用方便等优点，因此应用较为普遍。但由于耐热性不够高和韧性较差而限制了它的应用。通常，在环氧树脂中加入一定特性的高分子化合物进行改性，以提高某一方面的性能。

（2）环氧－酚醛胶　为提高耐热性，用酚醛树脂对环氧树脂进行改性。由于酚醛树脂中含有很多活性羟甲基，能与环氧树脂的环氧基和羟基反应，得到一个高度交联的固化体系，从而保证固化物有良好的耐热性。此类胶的耐热性能较好，能在 150℃下长期工作，或在 250℃短期工作。

（3）环氧－尼龙胶　为提高韧性，可用与环氧树脂混溶性好的羟甲基尼龙或三元共聚尼龙对环氧树脂改性。它利用环氧树脂中的环氧基与尼龙分子的酰胺基上的活性氢原子进行接枝反应而交联成网状结构，在双氰胺的作用下适当提高交联度。这样既发挥了环氧树脂粘附力强的优点，又利用尼龙大分子链柔顺性好、韧性好的长处，故胶层具有强而韧的优点。

固化条件为 165～170℃下 2h，压力 0.1～0.3MPa。它常用于粘接铝、黄铜、碳钢、不锈钢等金属材料，有较高的剪切强度。

（4）环氧－丁腈胶　为提高粘结强度和疲劳强度，常用液体丁腈橡胶或羧基丁腈橡胶对环氧树脂改性。丁腈橡胶与环氧树脂反应与酸酐和环氧树脂反应相似，

使橡胶分子链嵌入胶的组成中，因此固化产物有较高的粘接强度，固化条件为120℃，3h。

（5）环氧－聚砜胶 聚砜是耐热性很好的工程塑料，它与环氧树脂有很好的混溶性，用它改性的环氧胶有极好的韧性和很高的粘接强度，J－19胶就属此类。此胶又分A、B、C三种型号。

J－19胶的缺点是耐水性和耐湿热老化性能差。例如，A、B型胶经水煮沸6h强度会降低四分之一；在55℃相对湿度98%条件下老化12天后强度约降低45%。

9.3.6 改性酚醛粘合剂

酚醛树脂固化后有较多的交联键，因此性脆而耐热性高。纯酚醛树脂胶很少应用，大多数经过改性，以保存酚醛耐热性和高粘接能力的同时增加胶的韧性。常见的改性酚醛胶有酚醛－丁腈胶，酚醛－缩醛胶等。

1. 酚醛－丁腈胶

酚醛－丁腈胶由酚醛树脂与丁腈混炼胶混合而成。丁腈混炼胶中含有各种橡胶配合剂，如硫化促进剂、防老剂、填料等。混合时要求溶剂对树脂和橡胶均有较好的溶解能力。常用的溶剂有甲乙酮、醋酸乙酯、甲苯等。

丁腈橡胶因含有腈基而对金属有很好的粘合强度。如果再加上羧基，则使金属的粘合性有进一步提高。这样的活性基化合物与酚醛树脂复合，加热时一方面酚醛和丁腈橡胶中的双键结合而固化，另一方面丁腈橡胶中的腈基和酚醛树脂中的羟甲基反应，具有和硫化同样的交联作用。因此，它粘接强度高、弹性好、韧性好、耐振动、耐冲击，具有较广的使用温度范围，可在－50～180℃下长期工作，某些品种可达250～300℃。此外，还耐水、耐油、耐化学介质腐蚀。它的缺点是固化条件比较苛刻，需加压加温固化。

酚醛－丁腈胶主要应用于金属及大部分非金属材料的结构方面。室温下对铝和钢的粘接抗剪强度为24～28MPa，适用于工作温度较高的受力部件的粘接，如汽车制动片的粘合，飞机结构中铝、钛合金的粘合等。

2. 酚醛－缩醛胶

酚醛胶改性用的缩醛为聚乙烯醇缩甲醛、聚乙烯醇缩丁醛，有时也用聚乙烯醇缩丁糠醛。缩醛分子中的羟基可与酚醛树脂的羟甲基反应而形成体型交联结构，具有较高的粘接强度，特别是抗冲击和耐疲劳，同时具有良好的耐老化性能和综合性能，适用于各种金属和非金属材料的粘接。它的耐热性能比酚醛－丁腈胶差。

9.3.7 聚氨酯粘合剂

分子中含有一个以上异氰酸酯基的化合物称多异氰酸酯。它与醇作用能生成叫聚氨酯的高聚物。作为粘合剂使用时，不是采用聚氨酯高聚物，而是采用端基分别是异氰酸酯基和羟基的两种低聚物。在粘接过程中它们相互作用生成高聚物而硬

化。多异氰酸酯本身也可单独作为粘合剂使用。

聚氨酯胶的特点是：

1）结构中含有极性的异氰酸酯基团，对各种材料都有较强的粘附性。

2）异氰酸酯基有很高的反应活性，能与含活泼氢的基团（－OH、NH_2、－COOH等）发生作用，可制成双组分常温固化胶，也可制成单组分常温固化胶（固化时通过空气中的水分起作用）。

3）该胶具有较大的韧性，可用来粘接软质材料，如橡胶、塑料、皮革等。

4）有良好的超低温性能，而且随着温度的降低粘接强度反而升高，是超低温环境下理想的粘接材料和密封材料。

5）该类粘合剂耐溶剂性、耐油性、耐老化性能优良。

这类粘合剂的缺点是耐热性不高，机械强度也比较低，通常作为非结构胶使用。

由于聚氨酯胶具备上述特点，因而它的适用范围很广，可以粘接多种金属和非金属材料，例如铝、钢、铸铁、不锈钢、塑料、玻璃、陶瓷、橡胶、皮革、织物、木材等。同时根据配比的不同，可以得到不同柔性的胶层。工程上常用聚氨酯胶进行塑料与金属、橡胶与金属的粘接。

9.3.8 α－氰基丙烯酸酯胶

α－氰基丙烯酸酯胶是单组分常温快速固化粘合剂，又称“瞬干胶”。其主要成分是α－氰基丙烯酸酯，并配以稳定剂（二氧化硫等）、增塑剂等组分。目前国内生产的品种有501、502、504等。

α－氰基丙烯酸酯胶分子中有氰基和羰基存在，在弱碱性催化剂或者水分作用下极易打开双键而聚合成高分子聚合物。由于空气中总有一定的水分，当胶液涂到被粘物表面后在几分钟即初步固化，24h可达到较高的强度，因此有使用方便、固化迅速的优点。

这类胶是一种粘度很低的液体，对大多数材料均有较好的润湿性。同时它的大分子链中带有极性基团，因此对多数材料都具有较好的粘接性能，适用面广。

此类胶的缺点是耐热性和耐溶剂性较差，使用温度范围为－40～70℃。

这类“瞬干胶”应密封干燥贮存，温度应保持在10℃以下。否则水分会使胶液聚合而失效。

9.3.9 厌氧粘合剂

厌氧胶是一种在常温下有氧时不能固化，而当排除氧气后即能迅速固化的胶。其主要成分是甲基丙烯酸的双酯，此外根据使用条件的要求还要加入引发剂，它的作用是产生自由基引发单体聚合。当有氧作用时，引发剂产生的自由基不引发单体聚合；隔绝氧时，引发剂产生的自由基很快使甲基丙烯酸双酯的单体聚合。常用引

发剂为有机过氧化物。为加快胶的固化过程还要加入固化促进剂。

厌氧胶具有良好的流动性和密封性。固化后其抗腐蚀性、耐热性、耐寒性均较好。厌氧胶的主要用途是作螺纹的紧固密封，防止振动部位螺钉、螺母的松动，可以省去弹簧垫圈、开口销等，增加机械部件的可靠性。此外，对螺纹件和管线螺纹的密封和防泄漏效果也很好。因其粘接强度不是特别高，因此粘接密封后的螺纹仍有可拆性。厌氧胶也可以用来堵塞金属构件的细缝，铸件砂眼及法兰面、箱体结合面的密封等。厌氧胶不适于粘接多孔性材料和填充较大的缝隙。缝隙大于0.2mm时，固化强度便较低，甚至难以固化。

9.3.10 无机粘合剂

无机粘合剂的种类很多，目前在机械工程中应用最广的是磷酸—氧化铜无机胶。它具有以下特点：

1）具有优良的耐热性。据介绍，在温度为600℃时还能保持原强度的80%，在800℃时仍有一定强度。在耐高温方面，有机合成粘合剂是无法同它相比的。

2）粘接强度高。用于钢铁套接，其抗剪强度为100MPa，抗拉强度为22MPa。

3）有较好的耐低温性能。在-186℃时强度仍无变化。

4）具有极好的耐候性。耐水、耐油性较好，但不耐酸碱腐蚀。

这类胶的主要缺点是性脆、不耐冲击。

磷酸-氧化铜胶是用粒度在200~300目的氧化铜粉和磷酸溶液均匀调和而成。氧化铜与磷酸溶液的配比要适当，一般每毫升磷酸溶液配3.5~5g氧化铜粉。氧化铜多，粘接强度较高，但胶的适用期短。为缓和固化反应，延长胶液的使用期，常要在磷酸溶液中加入氢氧化铝，并加热到200℃左右使其溶解呈透明的甘油状溶液，然后再和氧化铜粉调合后使用。

根据无机胶的性能特点，要求被粘接的表面比较粗糙，接头应尽可能采用套接或槽接形式，粘接面间隙控制在0.3~0.4mm之间。胶液调合好后应尽快涂在粘接面上，立即粘合并施加压力，先在室温下放置2~3h，待其初步凝固后，送入70~80℃烘箱内烘2~4h就可使用。

磷酸-氧化铜胶目前多用于各种刀具（如车刀、铣刀、铰刀等）的粘接，钻头的修复和接长，小砂轮的粘结以及塞规、卡规等量具的粘结，铸件砂眼堵漏，气缸盖裂纹的胶补等。

9.4 粘接工艺

从粘合剂的制造到完成粘合，一般经以下几个步骤：

1）粘合剂的选用。

2）被粘物表面处理。

3）涂胶。

4）晾置。

5）搭接、固化。

6）性能检测。

在上述每一步骤中，如果不严格遵守一定的工艺规程，都会对粘合强度有较大影响。粘合剂的配制工艺要严格，成品的浓度、粘度、比重、氢离子浓度等指标都要符合要求。

常用的聚乙烯、聚丙烯薄膜用电晕方法处理之后要及时粘合。

粘合时的温度、压力、加压时间、施胶方法、搭接宽度、胶层厚度、涂胶以后晾置时间、固化温度等对粘合强度均有影响。最初接触粘合工艺的人往往认为，粘合剂层越厚，粘合的越牢，其实不尽然。在一定范围内，随粘合剂层厚度增加，抗拉强度和剪切强度随之减小，剥离强度随之增加。胶层厚度增加时内应力变大，所以一般规律是：在均匀涂敷的前提下，粘接强度随胶层厚度的减少而增加。

9.4.1 粘合剂的选用

粘合剂选择的合理与否是影响粘接强度的关键因素。在选用粘合剂时一般要考虑以下因素：

（1）被粘材料　各种粘合剂对不同材料的粘结力是不同的。

（2）受力条件　受力构件的胶结应选用强度高、韧性好的结构胶。若用于工艺定位而受力不大时，则选用通用型粘合剂。

（3）工作温度　一般来说，橡胶型粘合剂只能在 -60 ~ 80℃下工作。以双酚 A 环氧树脂为基料的粘合剂工作温度在 -50 ~ 180℃之间，无机粘合剂可在 500℃以下工作。

（4）其他　如成本、工作环境等。

9.4.2 粘接接头的设计

1. 接头受力种类及常见接头类型

粘接接头在使用中可能受到的作用力主要有拉力、剪切力、扭力、不均匀扯离力和剥离力五种。

拉力：垂直作用于粘接面的力称为拉力（图 9-2）。如果接头材料和粘合剂的弹性模量都很高，那么作用力是均匀分布的。

剪切力：平行作用于粘接面的力称为剪切力（图 9-3）。承载这种力的接头应力分布一般是不均匀的。

扭力：使接头产生扭转作用的力称为扭力（图 9-4）。粘接接头承受这种力时，应力一般是极均匀地分布在整个粘接面。

不均匀扯离力：作用于整个接头粘接面上但分布不均匀的作用力称为不均匀扯离力（图9-5）。这种作用应力主要集中在粘接面边缘的一个小区域内。

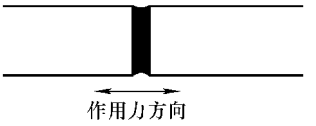


图9-2 拉力



图9-3 剪切力

剥离力：作用于粘接面一边缘线的力称为剥离力（图9-6）。由于剥离力作用在一条线上，所以承受剥离力的接头承载能力很小。

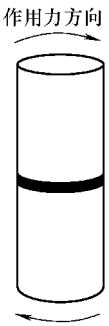


图9-4 扭力

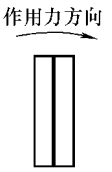


图9-5 不均匀扯离力

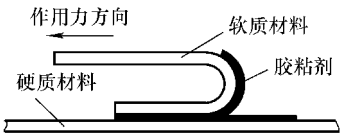


图9-6 180°剥离力

虽然在实际工作中，接头形式千差万别，但其基本形式只有以下八种。其他接头，无论多么复杂都是这八种基本接头形式演变和复合而成的。

（1）纯嵌接接头 是效能最好的接头之一。根据理论分析，在理想的纯嵌接接头中几乎没有应力集中现象。只要角 θ 足够小，它的粘接强度可以超过被粘接材料本身的强度。具有占据空间小，不影响工件外形等优点。但由于纯嵌接接头的斜面不易加工，实际应用的并不多。纯嵌接接头如图9-7所示。

（2）搭接接头 这种接头所受的作用力一般是剪切力，如适当选择接头尺寸，应力分布也较均匀，因此有较高的强度。这种接头容易加工，在实际生产中应用较多。搭接接头如图9-8所示。

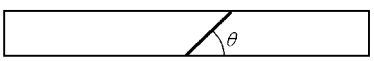


图9-7 纯嵌接接头

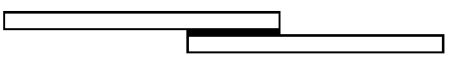


图9-8 搭接接头

（3）套接接头 这种接头，在负荷时所受的作用力基本上是纯剪切力，再加上粘接面积大，因此强度很高。套接接头如图9-9所示。

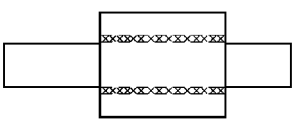


图9-9 套接接头

（4）对接接头 纯对接接头见图9-10a粘接面积

小，除拉力外任何方向的力都容易形成不均匀扯离力而造成应力集中，所以粘接强度很低，一般不采用。必须采用时要适当变换形式，如将对接接头变换为图 9-10 b、c、d、e、f 的形式。

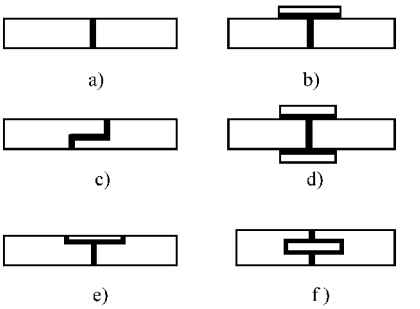


图 9-10　对接接头

（5）角接接头　纯粹的角接接头见图 9-11a、b 粘接面积小，并且所受的力是不均匀扯离力，所以强度很低，应避免采用。必须采用时应采取一定的补救措施，如采取如图 9-11c、d、e 所示的方法。

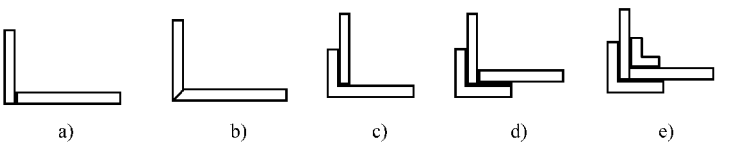


图 9-11　角接接头

（6）T 字接头　纯粹的 T 字接头见图 9-12a 粘接强度更低，一般不允许采用。如果改变其接头形式，采用支撑接头或插入式接头见图 9-12 的 b、c、d、e 则可以得到较好的效果。

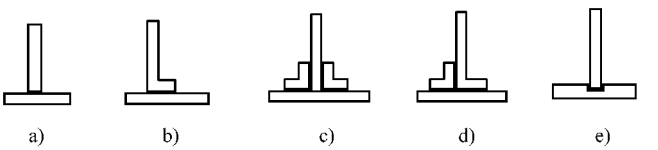


图 9-12　T 字形接头

（7）平面粘接　平面粘接接头虽然应力分布不太均匀，但粘接面积大，可以获得很高的粘接强度。当柔性材料和刚性材料之间粘接时，应采取防止产生剥离破坏的措施。

（8）槽接接头　这种接头实际上是由平面粘接和搭接组合而成的。由于这种接头无论哪个方向的力都分解为拉力和剪切力，所以这种接头可以得到很高的粘接强度。

2. 接头形式选择及尺寸确定

综上所述，在设计粘接接头时应注意以下几点：

1）一般粘合剂承受拉伸、压缩、扭转和剪切的能力要比承受剥离和劈裂作用的能力大。由于拉伸往往很少是理想的轴向拉伸，载荷一旦偏离就会形成剥离力和

应力集中，降低粘接强度。因此设计粘接接头时应尽量使胶层承受剪切力，例如板材粘接常采用搭接接头。

2）采用一些结构措施，使接头尽可能避免受剥离或劈裂的应力作用。

3）在可能而合理的情况下增大粘合面积以提高接头承载能力。增加粘合面积通常宜增加搭接宽度。搭接长度的增加虽可提高承载能力，但也带来应力分布不均匀。

为了克服搭接端部的应力集中现象，被胶件的端部最好加工成适当的斜度以提高承载能力。

4）在承受强大作用力的情况下，可采用复合连接的形式，例如胶—铆，胶—螺钉等形式。

5）接头便于加工，外形美观。

总之，在实际生产中接头的形式是千变万化的，要根据具体情况灵活设计。

例如，对于胶层承受剥离力或不均匀力的接头，通过改变接头形式，往往可以变成承受剪切力，提高剥离接头强度的方法如图 9-13 所示。

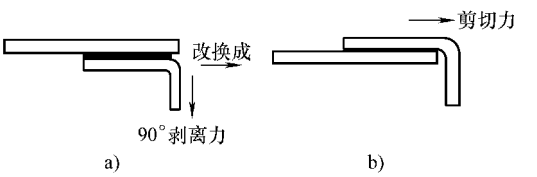


图 9-13 提高剥离接头强度的方法

比如，硬质合金车刀刀头与刀架的粘接，如果简单地采用平面粘接，使用时胶层承受不均匀扯离力，强度很差不牢靠。如改用槽接，不但增大了粘接面积，更主要的是将胶层所承受的力转变为剪切力，这样就非常牢靠了。

在设计粘接接头时，人们往往希望能通过计算，得出接头能承受多大强度。目前这方面的成功经验还不多，只能通过受力分析加计算的方法进行估计。现将其方法介绍如下。

接头受力分析就是考查接头在使用过程中会受到什么力，对于受拉力作用的嵌接接头和对接接头，因为应力分布均匀，其抗拉强度用粘接面积乘以单位抗拉强度即可，其不均匀扯离强度也可以这样计算。但对搭接接头，由于应力分布不均匀，则不能简单以胶的粘接强度乘以粘接面积。美国 Bloomingdale 公司提出了最佳搭接长度的设计方法，并得到了接头金属内部产生的拉应力 σ 与胶层内产生的剪切应力 τ 之间的关系：

$$\sigma = \frac{l}{t}\tau$$

式中 σ——接头金属内部的拉应力；

τ——胶层内部的剪切应力；

l——搭接长度；

t——金属厚度。

由上述关系式说明，接头金属越厚，搭接长度可越长。一般搭接长度为材料厚度的 5 ~ 10 倍最好。

以上计算所得的接头强度都是接头粘接后的平均强度，考虑到工艺条件往往控制不严，粘接强度分散性较大以及胶层疲劳、老化等因素，在设计接头时要有一定的安全系数。根据经验，安全系数取 2. 5 ~ 5 为好。

3. 点焊、铆接和螺栓连接与粘接并用

由于粘接有很高的抗拉、剪切和抗疲劳强度，但剥离强度和不均匀扯离强度较低；而焊、铆、螺栓等机械连接则与此相反。人们根据这一事实，创造了粘接和机械连接相结合。通过这种途径可以得到各种性能均优的新型接头，并获得了广泛应用。粘接、点焊和粘接 – 点焊接头强度比较见表 9-3。

表 9-3　粘接、点焊和粘接 – 点焊接头强度比较

接头类型	剪切强度/MPa	不均匀扯离强度/(N/cm)	疲劳强度（次数）
点焊（3cm^2 一个 ϕ4 焊点）	2 ~ 4	150 ~ 200	2×10^5
环氧树脂胶	18	50 ~ 100	4×10^6
粘接 – 点焊	18. 5	300	6×10^6

一般粘接 – 机械连接并用有下列两种形式：

（1）粘接为主，适当配以铆钉、螺栓或点焊加强薄弱环节。

（2）铆接、螺栓或点焊连接为主，粘接为辅以消除机械连接的应力集中现象。

粘接—机械连接的具体形式和加工方法如下：

（1）粘接 – 点焊并用　为了消除应力集中和提高接头的密封性，消除金属间的接触腐蚀，对于金属薄板结构件的连接，特别是在容易产生弯曲应力及剥离应力的部位，应采用粘接 – 点焊接头。这种接头形式一般有三种：

1）在连接表面涂布粘合剂，经预固化后进行点焊最后固化。这种方法对粘合剂要求较低，只要在点焊时焊点周围的胶能及时排开即可。这方法对点焊工艺也有一定要求，就是比正常点焊减少电流 10% ~ 20% 或增加电极压力 13% ~ 20% 。

2）在连接面上放置预先打好孔的胶膜，然后用夹具定位，再于孔的位置上进行点焊，最后固化。这种方法容易实现自动化，但对机械定位有一定要求。

3）先进行点焊，然后用注射器注胶，再固化。这种形式对点焊无特殊要求，但要求粘合剂有较小的粘度和较好的流动性。这种方法简便，效果也好，应大力推广。

粘接—点焊接头具有强度高、体积小和表面光滑等优点，在飞机的舱门、舱盖、油箱、加强隔框及机械工业中机箱制造方面应用。

（2）粘接 – 铆接并用　这种接头形式适用于大面积部件的连接。接头以粘接为主，用铆钉提高接头的不均匀性。其工艺是，在粘合剂固化前先打铆钉，然后固化，也可在粘合剂固化后安装铆钉。前一种方法利用铆钉的压力帮助粘合剂固化，

不必另外加压，但易产生胶层厚薄不均现象。后一种工艺方法较为复杂。

粘接－铆接接头制造简便，力学性能好，已在建筑、机械等行业中开始使用。

（3）粘接－螺栓并用 粘接－螺接连接与粘接－铆接无论在施工方法，还是在作用上都相似。接头应用螺栓，解决了接头承受不均匀扯离强度低的问题，应用粘合剂又解决了接头应力集中问题。这种接头形式在机车、桥梁上已应用。

9.4.3 表面处理

1. 表面处理的作用

粘接接头的强度是由粘合剂与被粘材料之间的粘附力和粘合剂的内聚强度决定的。表面处理的作用，就是使被粘材料表面洁净、坚实，以保证粘合剂和被粘材料的充分润湿和良好的结合。实验和生产的大量事实都证明：被粘材料表面处理的好坏，对粘接质量有很大影响。如被粘材料表面有一个分子层的蜡也会使粘接强度下降一半。

用环氧树脂胶粘接铝合金时，不同的表面处理方法所得到的粘接强度也有很大差异（表9-4）。

表9-4 不同表面处理对铝合金粘接强度的影响

表面处理方法	剪切强度/MPa
未处理	<5
碱洗	12
丙酮清洗、打磨	13
阳极氧化	10
阳极氧化、重铬酸钾封闭	22
硫酸、重铬酸钠处理	21

注：粘合剂配方为618#环氧树脂100份，二乙烯三胺8份，邻苯二甲酸二丁酯15份。

各种被粘工件在加工、运输、贮存时，总会受到污染而不利于粘接。这些污染主要有以下几种：

1）被粘材料在加工、贮存、运输时，表面会不同程度地被油、汗等污染。这些油污大多是非极性的，表面张力小，不易被极性、表面张力大的粘合剂润湿，因而妨碍与被粘材料的良好接触。这样油污就成为粘合剂与被粘材料表面接触的隔离层。

2）固体表面由于存在表面能，会吸附空气、水汽等气体。这些被吸附的气体往往起着粘合剂与被粘材料表面接触的隔离作用。

3）钢、铁和铜件在贮存、加工过程中表面会生成疏松氧化层锈蚀。如钢铁件在锻造热处理时表面会发生氧化反应生成氧化铁、四氧化三铁等；在潮湿空气中则生成水合氧化铁等铁锈，由于水合氧化铁电位比铁高，且多孔、吸水，一旦铁锈生成，钢铁件就将加速腐蚀。一般金属的锈蚀层质地疏松，内聚强度低，若不仔细清

除必定影响粘接强度。

4）非极性、弱极性高分子材料其表面张力小、化学活性低，也不易与极性粘合剂产生良好的粘附作用，需要进行表面活化处理。

5）极性高分子材料在注射加工时，表面往往有一层脱膜剂。这种脱膜剂是不能和粘合剂产生良好的粘附作用的。

被粘工件表面处理，就是改变上述五种不利于粘接的表面状态。但在实际操作时，要将潜藏在被粘件表面孔隙中的水分、空气、油污等完全去掉是很困难的，如金属表面的油污经过三至四次有机溶剂清洗有时还会残留一分子层。水分即使经150℃烘烤也不会完全除掉。由此可见，被粘材料的表面处理是一项非常困难而细致的工作，这就需要在进行表面处理时要做到仔细、认真不怕麻烦，使被处理的工件表面尽可能达到粘接要求。

2. 金属材料的表面处理

金属材料的表面处理，一般包括除油、除锈（氧化层）、活化三个步骤。

（1）除油　金属材料制品在机械加工和贮存过程中表面常常粘附油污（如机加工中使用的润滑油，贮存中涂的防腐油以及人手上的含油脂分泌物也会转移到工件上）。这些油污主要分两大类：一类是皂化油，包括动物油和植物油；另一类是非皂化油，如矿物油、凡士林等。这些油虽然性质不同但对粘接都是极其有害的，粘接前必须彻底清洗净。金属除油通常有有机溶剂法、碱性溶液清洗法和电化学法三种。

1）有机溶剂除油：由于有机溶剂能溶解金属表面的各类油污，不腐蚀金属，操作方便，所以应用较为广泛。常用的溶剂有：汽油、酒精、丙酮、甲苯、四氯化碳以及三氯乙烯、氟氯烷等。一般采用棉纱蘸溶剂擦洗的方法，但效率低，对人体毒性大。而气相清洗法效果较好，所谓气相清洗就是在密闭的容器下部放有低沸点溶剂，稍加热就变为蒸汽，在容器上部有冷却装置，蒸汽遇冷凝结下落而将挂在容器中的工件清洗干净。如三氯乙烯气相除油，三氟三氯乙烷气相除油等。尤其是三氟三氯乙烷气相除油，具有溶解力强、沸点低、无毒等优点。用三氟三氯乙烷蒸汽处理工件可有效地将油污带下。采用这种方法既可以免除人与溶剂接触，也不用经常更换溶剂。

用有机溶剂除油，有时还很难将金属表面油污完全去掉，有时需反复多次，用丙酮等需擦洗三次以上。

2）碱液除油：碱性溶液除油与有机溶剂除油相比，具有无毒、不燃、较为经济等优点。碱液除油的原理是借皂化和乳化作用实现除油。所谓皂化作用，就是酯类的动、植物油也可以与碱发生化学反应生成易溶于水的肥皂和甘油。皂化作用用于除去动、植物油。乳化作用是烷类矿物油在碱液中机械破裂成为不连续的油滴，并在油滴表面包裹碱或活化剂，从而降低油、水界面张力，减小油对工件的亲和力，使油滴进入溶液。

钢铁件碱液除油的典型配方是：

氢氧化钠 30～50g/L

碳酸钠 20～30g/L

磷酸钠 50～70g/L

水玻璃 10～15g/L

除油温度为80～100℃，时间30min左右。

铜及铜合金碱液除油的典型配方是：

氢氧化钠 10～15g/L

碳酸钠 20～50g/L

磷酸钠 50～70g/L

水玻璃 5～10g/L

OP乳化剂 50～70g/L

除油温度为70～90℃，时间10～30min。

还可以用活化剂清洗金属表面油污。用活化剂除油，具有去污力强、使用简便、安全无污染等优点。

此外超声波除油是将被处理工件放入超声波清洗槽中，清洗槽放有溶剂或活化剂水溶液。然后开动高频发生器，通过换能装置，将电能转变为机械振动即超声波，当频率为20～5000Hz时，就有足够高的能量对溶液进行翻动，同时在工件表面产生很大的机械冲刷力，将油污等撕掉和冲击下来，这种方法适用于小型精密工件的清洗除油。

（2）除锈 金属材料的表面除锈有机械处理法和化学处理法两种。

1）机械除锈法

① 手工除锈：主要是用砂纸、砂布、锤铲之类工具清除金属表面锈蚀。这种方法简便易行，但劳动强度大、工效低，用于对粘接强度要求不太高的工件的表面处理。

② 电动工具除锈：这种方法是借助于电动砂轮、电动刷、除锈枪等工具进行除锈。具有效率高，质量较好等优点。

③ 喷砂除锈：是通过压缩空气将砂石喷射到金属表面，通过强力摩擦与冲击作用清除金属表面锈蚀。用于喷砂处理的砂料主要有矿砂、河砂、海砂及石英砂、金刚砂等。大面积工件的表面处理常用这种方法。喷砂处理可分为干法喷砂和湿法喷砂两种，干法喷砂又可分为露天喷砂和密闭喷砂。

干法露天喷砂是以压力为4kg/cm^{2}以上的压缩空气，经油水分离后，将砂从喷砂罐喷射在工件表面上。这种喷砂法简便易行，适于大面积表面处理，但工作时粉尘浓度大，造成空气污染，并且砂粒不易回收。

干法密闭喷砂是将喷砂枪和工件都放在密闭的工作室里进行喷砂处理。这种方法的优点是没有空气污染现象，砂粒也容易回收，但不能对大面积工件进行喷砂

处理。

湿法喷砂是鉴于干法喷砂尤其是露天干法喷砂粉尘大，容易造成操作工人患硅肺病而改进的。湿法喷砂是将砂粒用含有 0.4% ~0.6% 的亚硝酸钠的水溶液处理后，洗掉砂粒上的粉尘再进行喷砂。湿法喷砂的优点是消除了粉尘，表面处理质量好，缺点是效率不如干法喷砂高，而且冬季不易露天操作。

2）化学除锈法：包括化学浸蚀和电化学浸蚀两种方法。所谓浸蚀，就是利用酸能溶解铁等氧化物这一原理，将金属表面用酸或酸性盐（对铝合金一般用碱）的溶液处理，除去氧化物的过程。

① 化学浸蚀：常见黑色金属表面的锈，主要成分是 Fe_2O_3，也有一些 FeO。金属在热处理时所形成的氧化皮，其外层成分是 Fe_2O_3 和 FeO（Fe_3O_4），这些氧化铁都可以用酸处理（硫酸、盐酸或混合酸）。

对于铸铁件因为它含硅往往要加入一些氢氟酸，以便使硅变成氟硅酸。

对铝和铝合金一般常用 10% 的氢氧化钠水溶液浸蚀，然后再用硝酸进行浸亮处理。

常用金属化学浸蚀法见表 9-5。

表 9-5　常用金属化学浸蚀法

金属	浸　蚀　液	温度/℃	时间/min
钢铁	1. 硫酸 200g/L 若干 3 ~5g/L 2. 盐酸 500 ~1000g/L 若干 3 ~5g/L	30 ~60 20 ~40	1 ~3 1 ~3
不锈钢	硝酸 200 ~400g/L 氢氟酸 25 ~50g/L	20 ~40	1
铜及铜合金	1. 盐酸（37%） 2. 硫酸 100 ~150g/L	20 ~30 20 ~30	0.5 ~1 0.5 ~1
铝及铝合金	先在 10% 氢氧化钠中浸蚀再在硝酸中浸蚀	80 ~100 20 ~30	0.5 ~1 0.1 ~0.2

② 电化学浸蚀：黑色金属在电解液中，通过直流电的作用，可以进行电化学浸蚀。当被处理的金属制品作为阳极进行电化学浸蚀时，是借助金属的电化学和化学溶解及金属上析出的氧气泡机械地剥落作用来清除氧化皮。当作为阴极进行电化学浸蚀时，除去氧化皮是借助于金属表面析出的氢对氧化物还原及机械剥落作用。

对于具有厚而致密的氧化皮的金属制品，先进行化学强浸蚀之后，使氧化皮疏松，再进行电化学浸蚀。电化学浸蚀的特点是浸蚀速度快，酸液消耗少，并能浸蚀合金钢。缺点是耗费电能，而且对表面不规整的金属零件浸蚀效果差。

阴极浸蚀的优点是金属基体一般不受浸蚀，不会改变零部件的几何尺寸。缺点

是容易引起氢脆。阳极浸蚀则相反。对于形状复杂的零件也可采用先阳极浸蚀，再阴极浸蚀的方法。

阳极浸蚀用的电解液通常是15% ~20%的硫酸溶液，温度10 ~30℃，电流密度为5 ~10A/dm^2。有时在电解液中添加适量的缓蚀剂如若丁等。

（3）化学活化处理 金属材料经过上述除油、除锈处理后能满足一般粘接要求。但要进一步提高金属材料的粘接强度，减少粘接强度的分散性还需对金属材料进行化学活化处理。化学活化处理的作用是进一步清除金属材料表面惰性物质，改变表面的性质，使其表面虽现高的表面能状态。例如，铝合金经硫酸－重铬酸钠化学处理剂处理后，表面形成许多很小而又致密的氧化腐蚀坑，大大增加了表面积。同时，这一层氧化膜具有高极性，能与极性粘合剂形成牢固的次价键，提高了粘附力。常用金属材料化学活化处理法见表9-6。

表9-6 常用金属材料化学活化处理法

材料	处 理 液	温度/℃	时间/min	后处理
钢铁	重铬酸钠20份、蒸馏水150份、硫酸50份	70 ~75	10	用6%稀盐酸清洗，再用净水冲洗烘干
铝合金	1. 重铬酸钠20份、蒸馏水170份、硫酸50份	60 ~70	5	净水冲洗烘干
	2. 阳极氧化，重铬酸钾水溶液封闭			
	3. 对铸造铝合金用，硝酸3份、氢氟酸1份	25	3	
铜合金	三氯化铁15份、硝酸30份、水200份	室温	3	同上
不锈钢	1. 重铬酸钠3.5份、水3.5份、硫酸200份	70 ~75	15 ~20	用2%稀盐酸清洗，再用净水冲洗烘干
	2. 盐酸80份、磷酸8份、氢氟酸4份	80 ~85	1 ~2	
铁及镁合金	1. 铬酸10份、硫酸钠0.05份、蒸馏水100份	25	3	净水冲洗烘干
	2. 偏硅酸钠8.5份、焦磷酸钠4份、氢氧化钠4份	25	5	
	3. 十二烷基磺酸钠4份、水450份	70 ~90	10	
钛	1. 氟化钠10份、三氧化铬5份、硝酸50份、水250份	25	5 ~10	同上
	2. 硝酸9份、氢氟酸7份、水30份	50	20	
锌	1. 20%盐酸	25	2 ~4	同上
	2. 20%醋酸	25	3 ~5	
	3. 磷酸5份、水95份	25	5	
铍	10% ~15%氢氧化钠	25	5 ~10	同上
镍	硝酸14份、蒸馏水30份、氢氟酸1份	50	20	同上
铬	盐酸50份、蒸馏水50份	90	1 ~5	同上

（4）金属材料表面处理质量检验　一般采用水滴法，即用蒸馏水滴在被处理金属表面，如果水成连续水膜，说明表面洁净，如果水成不连续珠状，则说明金属表面仍有非极性物质，需要继续处理。另外被粘材料一经表面处理应在 4 ~ 8h 之内使用，超过 8h 一般应重新处理。

3. 非金属材料的表面处理

（1）机械处理法　非金属材料的机械处理法和金属材料的机械处理法基本相同。要注意的是：对塑料等高分子材料不但要除去表面油污，还要去掉表面残存的脱膜剂、增塑剂和硫化剂等。对于极性塑料制品来说，机械处理采用砂纸打磨是一种较好的方法。

（2）物理处理法　是用电场、火焰等物理手段对被粘材料进行表面处理，这种方法主要用于非极性高分子材料。物理处理法设备一般造价较高，但处理时工效高，效果好，单件耗费材料少。具体方法主要有以下几种：

1）火焰处理：将被粘材料表面通过可燃气体燃烧产生的火焰进行瞬时高温燃烧，使被粘材料表面发生氧化反应，得到含碳的极性表面。这种方法适于聚乙烯、聚丙烯等。

2）放电处理

① 电晕放电处理：电晕方法处理是将被处理的材料放在两平板电极间，在空气或其他气体中通以高电压（如 15000V），使气体放电而碰撞要处理的表面，使材料产生极性表面。这种方法适用于聚烯烃薄膜。其装置是由电极和金属辊筒组成，施加 2 ~ 100kV，3000 ~ 5000Hz 的高频高压电，产生电晕放电。将薄膜通过放电区即产生一层极性膜，处理后有效期为一周。

② 接触放电处理：这种方法的装置与电晕放电法类似，但金属辊筒无绝缘层，当薄膜与金属辊筒直接接触，电极与辊筒之间加 2000V，1000Hz 交流电，处理速度为 60m/min，这种方法耗电少，处理均匀。

3）等离子处理：这种方法是用无电极的高频电场连续不断提供能量，使等离子室真空度为 1 ~ 10 毛的气体分子（多用惰性气体）部分激化成带正离子和电子的电离气体（等离子），这些等离子以每分钟几百至几千毫升的气流速度碰撞要处理的材料表面，使其生成极性层。等离子处理适用范围广，可以处理几乎所有的高分子材料，并且处理效果显著，如聚丙烯、尼龙、聚苯乙烯等材料处理用环氧树脂粘接，强度可达 20MPa 以上，聚四氟乙烯经处理后强度也可达 5MPa 以上，缺点是设备造价较高。

（3）化学处理法　是用酸、强氧化剂等将被粘非金属表面一切油污杂质清除掉或将非极性表面通过强氧化作用生成一层含碳等极性物质以利于粘接。常用方法见表 9-7。

表 9-7 常用非金属材料化学处理法

材料	处 理 液	温度/℃	时间/min	用处理	效果
玻璃陶瓷	重铬酸钠 66 份、硫酸 666 份、水 1000 份	70	10	用 5% 稀盐酸清洗，水冲烘干	
聚乙烯 聚丙烯	1. 重铬酸钾 4.5 份、硫酸 87.5 份、水 8 份 2. 硫酸 300 份、重铬酸钾 25 份、水 15 份	65 65	5 1～2	同上	剪切强度达 2.5MPa
氟塑料 氟橡胶	1. 置换法：取 6g 乙炔钠溶于 1000mL 浓氨中或取 3g 钠溶于 1000mL 液氨中，在真空条件下浸渍几秒钟即可置换一层氨基钠		0.1～0.2	丙酮清净晾干 300℃ 下烘干 15min	剪切强度达 10MPa
	2. 去氟法：用 128g 萘，1L 四氢呋喃置于有干燥出口管及汞封搅拌器的 2L 烧瓶中，然后将细粒钠 23g 溶于此溶液中，将此混合物存放 16h 后，在室温下搅拌 2h（呈黑色）后使用	室温	1～5		
	3. 表面涂敷法：涂敷由钛酸丁酯 5 份、过氟辛酸 1 份配制的溶液，晾干		5		
硅塑料 硅橡胶	1. 用活化剂涂敷 2. 用 KH－550 等偶联剂涂敷	25		晾干	
普通橡胶	1. 脱脂打磨后，浸于浓硫酸 1000mL、硫酸锂 50g 配成的糊状液中	25	30	水洗烘干	生成环化层
	2. 脱脂打磨后，浸于 85%～95% 浓硫酸中		5～10		
涤纶薄膜	先浸于氢氧化钠水溶液（30%）中，再用氯化亚锡（50%）溶液处理	80 25	5 5	同上	
聚甲醛	硫酸 300 份、重铬酸钾 25 份、水 15 份	25	0.2～0.4	用 5% 稀盐酸清洗，水冲烘干	
氯化聚醚	同上	70	5	同上	

（4）溶剂处理 这种方法是利用某些高分子材料可以在溶剂中能溶胀而不溶解的性质，进行溶胀处理。高分子经溶胀处理后，可提高其表面活性和增加分子的活动性而有利于被粘高分子材料与粘合剂之间的扩散，提高粘接强度。如聚烯烃材料可用甲苯、丙酮、氯仿等处理。这种方法比较简便但效果不太理想。

9.4.4 粘合剂的配制和涂敷

1. 配胶

粘合剂配制和涂胶的好坏是关系到粘接质量的一个重要因素。用同一种粘合剂，采用同样工艺条件粘接，由于配制粘合剂时搅拌均匀程度的差别，往往粘接强度要降低一半。

树脂与固化剂（或橡胶与硫化剂）只有比例适当，才能得到性能优异的粘合剂，一般树脂、橡胶都比较粘稠，配胶时不易搅拌均匀，这样尽管配胶的比例准确，但搅拌后的胶液却不一定处处都很均匀，如果搅拌得不够充分，就会出现有的地方只有树脂而另外的地方只有固化剂，这样就得不到好的固化产物，如以环氧树脂和二乙烯三胺配制的粘合剂为例，胶液配制时搅拌 5min，剪切强度为 15MPa，而搅拌 15 ~ 20s，剪切强度只有 6 ~ 8MPa。

另外某些单组分粘合剂如酚醛 - 氯丁粘合剂，使用前也应搅拌均匀或先倒置半小时再摇晃均匀，以防止组分中氧化锌等沉淀。

配胶量的多少，也应严格掌握，对于一些在常温下反应很慢的粘合剂可以一次配足所需要的使用量，而对一些在室温下反应快和固化反应放热量大的粘合剂应该少配勤配，否则会由于配好的胶液因反应放出的热来不及散发从而大大加快反应速度，导致放出更多的热量，结果使胶液在短时间内凝胶，甚至“爆聚”。

胶罐的中间夹层可根据胶种不同和气候的变化灌入冷水或热水，以保持胶液一定的温度便于施工。大量用胶时，一般在装有机械带动的桨叶搅拌器的调胶机中进行配胶。

2. 涂胶

（1）涂胶工艺对粘接强度的影响　涂胶就是将粘合剂用适当工具涂敷在被粘材料表面。这一工序进行的好坏对粘接质量也有一定影响。

1）胶液粘度和涂胶速度：粘合剂能否充分润湿被粘材料表面，除与被粘材料表面状态和粘合剂极性有关外，还与胶液粘度和涂胶速度有关。胶液粘度小，有利于涂敷，但粘度太小也会造成粘合剂流失。一般刮涂时胶液粘度为 0.5 ~ 3Pa · s。

由于被粘材料都有一定的表面能，所以在一般条件下都会吸附一定量的气体和水份。如果涂胶速度太快，这些气体、水分就来不及排除而被覆盖起来，起隔绝作用。而慢慢涂胶就会因被粘材料对粘合剂的吸附能力大于对气体等的吸附能力而赶走气体。当然涂胶速度太慢也会影响工作效率，一般以 2 ~ 4cm/s 的速度为宜。

此外，应注意对接头的每个被粘面（通常两个粘接面）都应分别涂胶，只有这样才能保证每个粘接面都能为粘合剂充分润湿。这一点往往被人们所忽视。

2）涂胶量：其大小会直接关系到粘合剂层的厚度，而粘合剂层厚度又是决定粘接强度的因素之一。粘合剂层厚度与粘接强度的关系如图 9-14 所示。

可见，粘合剂的粘接强度在达到一定厚度后，随胶层厚度的增加而降低，关于

粘合剂厚度为什么会影响粘接强度，一般认为有以下几个原因：

① 由于被粘材料表面极性分子的作用，在粘接过程中粘合剂分子中的极性基团会向材料表面移动，从而使粘合剂分子产生定向排列效应，这种效应深度可达0.1μm，并影响整个粘合剂层。因为粘合剂层越薄其定向效应越显著，所以内聚强度也越高。

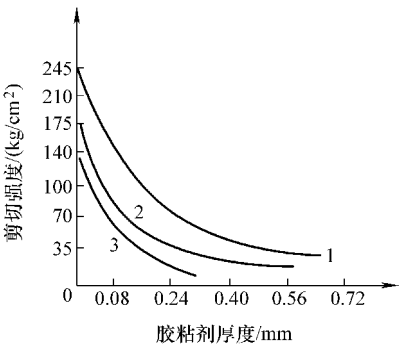


图9-14 粘合剂层厚度与粘接强度的关系

② 粘合剂层破坏时，通常发生在粘合剂层内部有缺陷的地方，从统计几率来看，粘合剂层越厚，胶层中气泡、裂缝等缺陷越多，粘接强度也越差。

③ 粘合剂层越薄，在一定负荷作用下，塑性流变越小，粘合剂就越不易被破坏。

④ 粘合剂在固化过程中会因体积收缩而产生内应力。一般粘合剂层越薄，体积收缩越小，相对内应力也就越小。

以上原则只适用于一般接头，对于不同膨胀系数材料的粘接，则容易因为胶层太薄而产生形变应力。此外粘合剂层太薄也容易缺胶而降低强度。一般无机粘合剂胶层厚度为0.1～0.2mm，有机粘合剂为0.05～0.15mm。

（2）涂胶方法及工具

1）刮涂法和刷涂法：这两种方法是最原始、最常用的方法。刮涂法是玻璃棒、刮刀等工具均匀地将胶液刮在被粘材料表面。这种方法主要适用于粘度较大的胶液的涂敷，但效率低且胶层不易均匀。刷涂法是用滚刷或油画笔等将胶液涂在被粘材料表面，这种方法只适于粘度较小的胶液的涂敷，效率较刮涂法高，且胶层较均匀。

2）喷涂法：这种方法适于大面积涂胶，工效高，但胶液浪费大，喷出的胶雾对操作人员身体有害。喷涂法所用设备与喷漆相同。

3）滚涂法：这种方法主要适用于压敏胶带的制造及蜂窝夹芯的制造。具有工效高，胶层均匀，易于自动化等优点。

4）热熔胶涂胶法：用热熔胶粘接小面积接头，一般采用热熔枪方法，是将热熔胶通入枪体加热、熔融，然后从枪头挤在被粘面上迅速搭接即可。

若用热熔胶粘接大面积接头，如用EVA胶制造聚乙烯聚丙烯复合薄膜，是将热熔胶通过挤胶机以熔融薄膜状挤出，涂在被粘薄膜面上液压而成。

9.4.5 粘合剂的晾置与固化

1. 胶层晾置时间与环境

粘合剂涂敷后是否需要晾置，应在什么条件下晾置以及晾置多长时间，要根据

粘合剂的性质而定。

1）对于像环氧树脂胶等没有惰性溶剂的粘合剂，一般不需晾置。

2）对于像 α－氰基丙烯酸酯这样在微量潮气催化下迅速聚合的粘合剂，晾置时间越短越好。晾置时间过长会产生胶层相对分子质量过低等弊病。α－氰基丙烯酸酯胶晾置时间与粘接强度的关系见表 9-8。

表 9-8　α－氰基丙烯酸酯胶晾置时间与粘接强度的关系

（单位：kg/cm^2）

晾干时间	1s	10s	30s	60s	3min	5min	10min	15min
硬聚氯乙烯	355	349	346	246	130	78	37	18
ABS 塑料	184	281	181	176	203	66	31	14
铁	146	145	143	138	115	97	56	25

3）对含惰性溶剂的粘合剂，如酚醛树脂胶等，应采用多层涂敷，并且每涂一层晾置 20～30min，以保证溶剂充分挥发。否则会因溶剂残存而降低粘接强度。

4）晾置环境的湿度一般越低越好，否则会因溶剂挥发，降低胶层表面温度，而凝积水汽，影响粘接强度。特别是对潮气敏感的聚氨酯胶、氯丁胶等影响更大。对于高温固化的粘合剂，可稍加温晾置，但要严格控制温度和时间，防止胶层早期固化。

2. 固化

（1）固化温度、时间及加热方法　温度、压力、时间是固化过程三个重要工艺参数，粘合剂固化需要一定的温度和时间条件，其中温度是主要的，但两者又是相辅相成的。在一定范围内，提高温度缩短时间和降低温度延长时间，可以得到基本相同的效果。一般来说，适当提高固化温度，有利于提高粘接强度。如若温度过高，固化速度太快，会影响润湿，使接头产生很大内应力，强度反而降低，并增加了对胶层的热老化作用。常用的环氧树脂胶固化温度、时间与粘接强度的关系如图 9-15 所示。

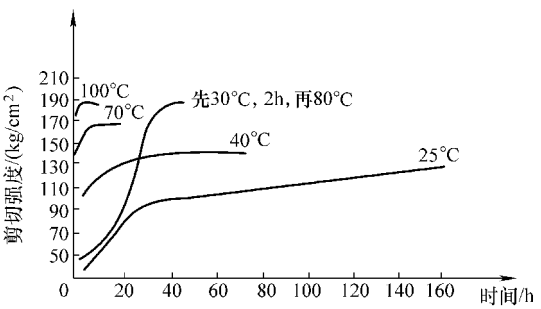


图 9-15　环氧树脂胶固化温度、时间与粘接强度的关系

粘接件固化时的加热方法通常有以下四种：

1）电烘箱加热：这种方法简便易行最常使用，尤其对小批量的粘接件更为合

适。缺点是周期长，耗电量大，且不易实现自动化。

2）红外线烘房或隧道窑加热：应用红外线特别是远红外线加热粘接件，可以很快将热量传到胶层内部，从而大大缩短固化时间。还具有耗电量较低，易于自动化生产等优点。

3）热风加热：这种方法主要用于压敏胶带涂胶加热。大型机件局部粘接也可以用理发用吹风机加热。优点是传热快，加热范围变化灵活。

4）工频和高频电流加热：粘接件可以用电磁感应器进行加热固化。把感应器移近粘接件，由于磁通量变化的影响，就在其中发生涡流使它很快加热。也可以把零件放入强力螺线管中干燥，粘接件则由于涡流和磁滞现象很快加热。

（2）压力的作用及加压方法　在粘合剂固化过程中，一般都应施以一定的压力。固化时施加压力的目的是增加粘合剂对被粘材料表面的润湿和对表面微孔、缝隙的渗透；有利于排除胶层中残留的气体和低分子挥发物；控制胶层厚度；起工艺定位作用。另一方面在粘合剂固化过程中，由于析出气体或体积变化而产生粘合剂与被粘材料相分离的现象，施加一定压力就可以保证粘合剂和被粘材料紧密结合。压力的大小应根据粘合剂性质而定。如压力不足将引起胶层疏松，有气泡、厚度过大和不均匀；但压力过高可能造成严重缺胶，使粘接强度降低。

1）对于固化前相对分子质量低、流动性好，并且在固化过程中不产生水、醇等低分子产物的粘合剂只要触压就可以得到牢固的接头。如环氧树脂胶、聚氨酯胶、不饱和聚酯胶、α－氰基丙烯酸酯胶等。

2）对于固化前相对分子质量高及固化过程中会产生水、醇等低分子产物的粘合剂如酚醛树脂胶、聚酰亚胺胶，应施加 1～5kg/cm^2 的压力。

3）对于氯丁胶等相对分子质量高但初粘力很大的粘合剂，可只在叠合时加一次压，在固化过程中也可以不用再加压。

4）对于膜状热熔粘合剂，为了保证能良好地润湿被粘材料，在固化过程中需要施加 5kg/cm^2 以上的压力。

固化时加压方法通常有以下几种：

1）触压：所谓触压就是靠被粘工件自身的重量使粘接接头压紧，环氧树脂粘合剂等可用此法，要求粘接接头应较平整，摆放时接缝不错位，并且工件本身有一定重量。

2）锤压：就是用木榔头等将粘接部位均匀砸实，适用于氯丁胶。

3）机械夹子加压：对于形状复杂需加较高压力固化的粘接接头，通常采用螺旋夹子、偏心夹子（图 9-16）等将接头夹好。这种方法方便灵活，压力高，但工效低，压力不易均匀，不适于薄形接头加压。

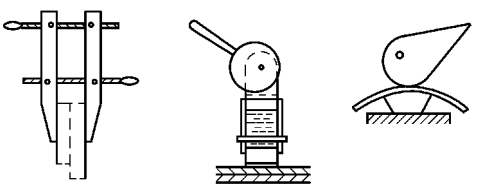


图 9-16　螺旋夹子和偏心夹子

4）液压机加压：这种方法产生的压力大而均匀，并可在加压同时加热。主要用于胶合板、复合材料的制造。

5）滚压：即用橡皮滚或钢滚将粘接面滚实，这种方法主要用于复合材料的制造。例如，钢板表面粘贴塑料板，复合塑料薄膜制造等。

6）气囊加压：这种方法是将橡皮气袋贴在被粘工件上，然后放到特制的气压机里固定好，再往橡皮袋里充气，靠气袋传送压力，使接头加压。这种方法主要适用于薄形接头（如飞机蒙皮）的加压。

7）热压罐加压：这种方法是将橡皮袋贴在被粘件上，放入加压罐中固定好，然后往橡皮袋中充气，最后往热压罐中通入蒸汽加热加压，保持一定时间即可。

8）真空加压：这种方法是将被粘件装配好后，盖上一层密封布袋，其边缘与被粘件夹紧密封，然后将袋内空气抽出，靠外界大气加压。若需加热，可加上加热设备，这种方法可用于夹层结构件制造。

9.4.6 塑料的粘合

塑料材料由于其性能的特殊性，与其他材料的粘合方法有些不同，在此单独介绍如下：

塑料的粘合方法大致分三种：热熔粘接、溶剂粘接及粘合剂粘接。

（1）热熔粘接　通过加热使塑料的被粘合部分软化熔融，将处于粘流态的塑料紧密贴合并加压使其粘合牢固，待冷却后即固化形成牢固粘合。很多塑料袋、板、管等的热封合或热焊接等都属此类，塑料包装袋的脉冲热合、高频电热法等也属此类。

（2）溶剂粘接　这种粘合方法是以塑料的溶解性为基础的。它以单一溶剂或混合溶剂为粘合材料。用于粘合的溶剂必须对被粘物表面有充分的活性，能使被粘物表面产生一定程度的、均匀的溶胀、软化和溶解，然后将两个被粘合表面贴合，稍加压力，待溶剂挥发后，即形成粘合。

用溶剂粘合时，要求所选择溶剂的溶解度系数与被粘合塑料的溶解度系数接近。例如，查得聚苯乙烯的溶解度系数为 9.1，那么可以用溶解度系数为 9.1 的醋酸乙酯或溶解度系数为 9.3 的甲乙酮作溶剂，但不能用溶解度系数为 9.6 的醋酸甲酯或溶解度系数为 10 的丙酮作溶剂。如果找不到合适的单一溶剂，也可以采用混合溶剂。例如，硝化纤维素塑料的溶解度系数为 11，可用溶解度系数为 12.7 的乙醇和溶解度系数为 7.4 的乙醚混合溶剂，调节到接近 11，即可以很好地溶解粘合。

另外，所选择的溶剂必须有适当的挥发速度和操作性能。这就要求选择有适当沸点的溶剂。挥发速度过快，容易引起塑料表面白化和龟裂；挥发速度太慢，又会影响粘合速度。所以在实际应用中，往往用混合溶剂以调节挥发速度并保证粘合质量。一般地，沸点越低，蒸发速度越快；沸点越高，蒸发越慢。

塑料的溶解性和它的结晶度有关。一般地，结晶度低的易溶，结晶度高的难

溶。天然橡胶、聚异丁烯、聚苯乙烯等无定形聚合物易溶；聚偏二氯乙烯树脂、聚四氟乙烯等支链较少，具有对称结构，结晶性较大，不易溶解；高压聚乙烯结晶度高，难溶解；低压聚乙烯的结晶度更高，更难溶解。因此对结晶性塑料，溶剂粘合方法是不适用的。

（3）粘合剂粘接　前面两种方法对热固性塑料是不适用的，但粘合剂粘合对热塑性塑料和热固性塑料都适用，而且粘合强度也较高，是最普遍使用的一种方法。

在塑料粘合中，值得提出的是聚乙烯、聚丙烯等聚烯烃类塑料的粘合。这类塑料极性小，化学稳定性强、结晶度高，属于难粘塑料，一般应选择非极性或者极性较低的聚合物作粘合物质。

如果采用极性聚合物粘合聚烯烃塑料，一般应在粘合前进行表面处理，如电晕处理、火焰处理、化学处理、溶剂处理等。对于包装塑料薄膜，常采用电晕处理方法。电晕处理适合于连续生产。处理后的表面极性增加，并在表面形成微细的痕纹，使表面粘合性能改进。一般地，处理后的表面应尽快粘合，时间长了会使处理产生的活性下降，影响粘合强度。

9.5　粘接质量无损检验方法

由于粘接层在接头内部，而且接头又不能破坏，所以粘接接头难以用一般方法检验。现在虽然有了一些无损检验粘接接头的方法，但都还不够成熟，有待进一步改进提高。现将这些检验方法介绍如下。

9.5.1　目视法

这种方法简单方便，但准确性和可靠性较差。检验人员用肉眼及放大镜观察分析接头处余胶的状态和挤出情况判断粘接质量问题。目视法检验应注意两点：第一观察挤出的粘合剂固化后是否光亮平整和形态一致。如果表面发乌或形态不一致，色泽过浅或过深，则质量可能有问题；第二观察胶缝和余胶挤出情况，如果胶缝和挤出的余胶是均匀的则质量较好，如果不均匀则说明粘合剂层有过厚和缺胶现象。

9.5.2　敲击法

这种方法是用圆头金属棒，连续敲击整个粘接面，仔细听其声响。如果各处发生的声音响度一样，并且较大，则粘接质量较好；否则某些地方声音不均匀或持续时间较短及有空洞的声音，则是粘接不好的部位，这种方法一般只适用于金属接头。这种方法的准确程度要依赖于检验人员的经验。

9.5.3　声阻探伤法

声阻探伤是按声阻原理进行检验的，这种方法适用性较大。在使用时，通过抗

声阻探伤仪来测定粘接接头机械阻力的变化。一般材料、制件吸收超声波的程度是一定的，如果遇到粘接有缺陷时，因这些缺陷会形成空隙，则测得的阻抗就剧烈下降，由此可以确定粘接接头是否有缺陷。这种方法的缺点是随粘接接头厚度增大灵敏度明显下降。另外对弹性模量较低的材料效果差。

9.5.4 超声波探伤法

超声波是指频率大于20kHz，不能被人们听觉所感觉到的弹性振荡。探伤用的超声波为10^6数量级。由于超声波几乎完全不能通过空气和固体材料相接触的界面，所以在探测粘接接头时，如果接头没有缺陷，超声波就可以全部穿过接头，如果有空隙及气泡等缺陷时，超声波就会被这些缺陷反射回来。超声波探伤法就是根据这个原理进行工作的。超声波探伤根据发射探头和接收探头的相对位置不同，通常可分为反射法和穿透法两种。

1. 反射法

这种方法是将接收探头放在超声波发射探头一方，用以测量反射波。在检验时，超声波（频率为100～200kHz）传送途径上如有缺陷存在，则一部分超声波就被反射回来，这时接收探头就收到信号而检查出接头中缺陷的位置和大小。

2. 穿透法

这种方法是将接收探头放在超声波发射探头的另一方，用以测量穿透工件接头的超声波。如果在超声波（频率应在10MHz以上）传送途径上有缺陷存在，则有一部分超声波不能穿透接头而被检查出来。探测原理如图9-17所示。

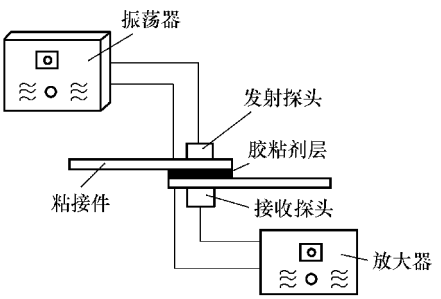


图9-17 超声波探测示意图

超声波对空气层的存在是非常敏感的，特别是对金属工件的接头，可以发现很小的缺陷。由于探头与制件表面接触时总是有一层极薄的空气膜，即使这层气膜的厚度只有10^{-3}cm，超声波也会全部反射回来，所以必须在探头与接头之间涂一层油膜或将接头浸在油中。这样就给它的使用带来了不便。

9.5.5 液晶探伤法

液晶是在一定温度范围内既有液体流动性，又具有晶体的光学特性的某些有机化合物。它的颜色及透明度可随温度、电场、形态及吸附气体等条件的变化而发生变化。由于液晶具有这些特性，所以它可以用于无损探伤。

探伤使用的液晶一般是胆固醇型物质，其中最常用的是胆固醇羧酸酯。使用时将液晶及其填充剂涂于粘接接头表面，然后将其均匀迅速加热，当接头粘合剂层有缺陷时，由于其密度、比重和导热不同将引起热传导的不均匀，在那些有缺陷

(空洞)的地方温度升得就快一些，反应在液晶上颜色就和没有缺陷的地方不一样。

液晶探伤的优点是反应灵敏，速度快和直观，特别是对蜂窝夹层结构的探伤效果比其他方法都好。它的缺点是，对不同材料检验前需进行条件试验，选择合适的配方和加热温度，成本较高，此外，接头厚度限制在3mm以内。

9.5.6 辅助检验

粘接工件的同时，用同一种粘合剂和同种工艺粘接3~5个标准试样，然后测试其粘接强度。这种方法可以检查胶液质量和配胶、晾置、固化等工艺操作中的问题。

9.6 安全和防护

粘合剂在配制和使用过程中经常要接触到多种有不同毒性的原料，因防护不当发生操作者中毒的事例屡见不鲜，在此将粘合剂配制和使用中的安全和防护介绍如下。

9.6.1 常见粘合剂和溶剂的毒性

化学物质的毒性一般由动物实验半数致死剂量LD_{50}（或浓度LC_{50}）、最小致死剂量MLD（或MLC）、绝对致死剂量LD_{100}（或LC_{100}）等来表示。

急性毒性的指标通常用LD_{50}（LC_{50}）来表示，意思是一次给药（吸入）后，引起半数实验动物死亡的剂量（浓度）。LD_{50}的单位为mg/kg体重，LC_{50}为mg/m^3或mg/L。LD_{50}数值越大，说明该化学物质毒性越小。化学物品毒性分级见表9-9。

表9-9 化学物品毒性分级

毒性分级	大鼠一次口服致死量 LD_{50}/(mg/kg)	6只大鼠吸入4h死亡2~4只的浓度(ppm)	兔涂皮致死量 LD_{50}/(mg/kg)	人的可能致死剂量/g
剧毒	<1	<10	≤5	0.06
高毒	1~50	10~100	5~43	4
中等毒	50~500	100~1000	44~340	30
低毒	500~5000	1000~10000	350~2810	250
实际无毒	5000~15000	10000~100000	2820~22590	1200
基本无害	>15000	>100000	≥22600	>1200

一般粘合剂的主体成分即各种高分子化合物，在常温下是无毒或低毒的。粘合剂的毒性主要来自它的溶剂、残留单体、固化剂、交联剂、促进剂和防老剂等。它们会在粘接过程尤其加热固化时释放出毒物，影响操作者的健康。

1. 常用溶剂的毒性

有毒溶剂最高允许浓度见表 9-10。

表 9-10 有毒溶剂最高允许浓度

有毒溶剂	最高允许浓度/(mg/m³)	有毒溶剂	最高允许浓度/(mg/m³)
氨	20	丁醇	200
丙酮	200	苯酚	5
苯胺	5	甲醛	5
苯	50	氯代苯	5
甲苯	100	二氯乙烷	50
二甲苯	100	四氯化碳	50
硝基苯	5	乙醚	300
溶剂轻汽油	100	醋酸乙酯	200
溶剂汽油	300	醋酸丁酯	200

2. 酚醛树脂粘合剂的毒性

酚醛树脂粘合剂的毒性除溶剂外，主要来自树脂缩聚时未反应的单体，如苯酚、甲醛等。苯酚的 LD_{50} 为 530mg/kg，甲醛的 LD_{50} 为 500mg/kg。按化合物毒性分级都接近“中毒性”。

3. 尿醛树脂粘合剂的毒性

尿醛树脂粘合剂的毒性，主要来自胶液中的甲醛。

4. 环氧树脂粘合剂的毒性

纯净的环氧树脂在常温下是无毒的（若含有少量单体则稍有毒性）。所用的固化剂如胺类固化剂等是有毒的。此外，活性稀释剂多数也有毒性。环氧树脂粘合剂常用固化剂和活性稀释剂的毒性见表 9-11。

表 9-11 环氧树脂粘合剂常用固化剂和活性稀释剂的毒性

名　　称	LD_{50}/(mg/kg)	毒性级别	对人的毒害
乙二胺	620	低毒接近中毒	皮肤过敏、红斑、哮喘等
二乙烯三胺	2330	低毒	同上
β－羟乙基二胺	4032	低毒接近实际无毒	向上
间苯二胺	80	中毒接近高毒	神经中毒、皮炎、哮喘
邻苯二甲酸酐	800～1600	低毒	对眼、呼吸道有刺激
顺丁烯二酸酐	400～800	中毒	同上
咪唑	3000	低毒	毒性很低

5. 聚氨酯粘合剂的毒性

聚氨酯粘合剂的毒性主要有：溶剂如环己酮、二甲苯、醋酸丁酯等。未反应的

单体，甲苯二异氰酸酯 LD_{50} 为 5800mg/kg，虽无毒，但具有刺激性，吸入少量咽部就会感到干燥、发痒和咳嗽等。

6. 聚丙烯酸酯类粘合剂及厌氧胶的毒性

热塑性丙烯酸树脂粘合剂、反应型丙烯酸树脂粘合剂、α－氰基丙烯酸酯粘合剂的树脂都是实际无毒或基本无害的，其单体有些是低毒的。

7. 不饱和聚酯粘合剂的毒性

不饱和聚酯粘合剂的毒性来自交联剂苯乙烯。它虽属低毒品，由于聚酯粘合剂中苯乙烯含量高，挥发性大，再加上气味难闻，因此有一定的危害性。

8. 热塑性树脂粘合剂的毒性

一般热塑性树脂粘合剂如甲苯胶、聚醋酸乙烯胶、硝基胶等本身没有毒性。其毒性主要来自溶剂。

9. 橡胶粘合剂的毒性

各种橡胶粘合剂的毒性，主要来自促进剂、防老剂和溶剂。另外加热硫化时也会放出一些单体，也有毒性。

10. 热熔胶和压敏胶的毒性

常用的热熔胶和压敏胶，由于主体成分都是高分子化合物，又不含溶剂，所以都是基本无害或实际无毒的。因此这两类粘合剂对人体和环境危害最小，这也是它们发展较快的原因之一。

9.6.2 中毒的途径、症状及防护

1. 中毒的途径

在应用粘合剂过程中，毒物进入人体一般有三条途径：一是由呼吸道吸入体内；二是通过皮肤侵入体内；三是由消化道进入体内。这三条途径中前两条是主要的，第三种途径，一般是由于使用粘合剂时，手上沾染毒物没洗手就吸烟、吃东西将毒物带入体内。毒物由呼吸道吸入体内的道理很简单，毒气吸进体内后一部分被肺泡吸收，浸入血液并传到全身。由皮肤侵入是由于粘合剂中的毒物主要是一些有机物，大部能与脂肪相溶，所以比较容易侵入皮肤，进而通过毛细管侵入血液造成慢性中毒，这是粘接工人中毒的一个重要而又容易被忽视的途径。

2. 中毒的症状

除在缺少安全条件下大量使用粘合剂的情况外，一般粘接工人不会发生急性中毒症状。较为常见的中毒症状是皮肤反应、呼吸道反应和某些慢性中毒症状。

（1）皮炎、湿疹型　这是最常见的皮肤反应。大量接触尿醛树脂粘合剂、酚醛树脂粘合剂、胺固化环氧树脂粘合剂都会引起接触性皮炎。其主要表现为出现水肿性红斑、丘疹或水疱等。发病部位一般是面、颈、手和前臂。症状是感觉瘙痒、灼热或疼痛，一周左右即可消退。如继续接触粘合剂可反复发作，经久不愈。

（2）皮肤、粘膜溃疡型　常因直接接触环氧树脂活性稀释剂等某些刺激性强

的化学物品引起皮肤出现疱疹，芝麻粒到黄豆大小的溃疡等，重者可导致局部皮肤坏死。

（3）呼吸道及眼部症状　最常见的有：喉痛、发干、发痒、胸闷、咳嗽以及流泪、眼结膜红肿等。严重者可发生中毒性支气管炎和支气管肺炎。

（4）神经系统症状　短期内吸入较高浓度对神经系统有毒的毒物如苯乙烯、环己酮、苯类、三氯乙烷等，可引起头晕、头痛、乏力或恶心、呕吐等症状。严重的可有步态蹒跚、视力模糊、神志迟钝甚至昏迷抽搐等。长期接触毒物可引起头晕、失眠、健忘、多梦、食欲减退等现象。

（5）肝脏病变及白细胞减少症　长期接触各种毒物，可损害人的肝脏机能，引起肝脏病变和白细胞减少症状。

3. 防护

（1）加强通风排气　通风排气是避免呼吸道吸入毒性物质的有效措施。一般凡是大量使用含有毒性挥发液体的粘合剂的现场，都应有通风排气设施。常用的通风设备有通风柜、通风罩等。另外烘烤粘接件的烘箱上面最好也装有通风罩。

（2）采用机械代替人工操作　采用涂布机和机械手代替人工操作，可以避免人与毒物接触，因而也就杜绝发生中毒现象。

（3）选用无溶剂的粘合剂或水溶性粘合剂　一般粘合剂的毒性主要来自溶剂，如果采用无溶剂或水溶性粘合剂如热熔胶、水乳胶等，不但可以大大减轻粘合剂的毒性，而且可以避免火灾的发生。

（4）个人防护用品的使用　主要包括口罩、防毒面具、手套和皮肤防护剂等。下面介绍一下皮肤防护剂的配制和使用方法。

① 液体手套：主要用于防护各种有机溶剂侵入人体。

配方：干酪素　100g
　　无水碳酸钠　10g
　　无水乙醇　280mL
　　甘油　75mL
　　蒸馏水　280mL

配制方法：将干酪素和蒸馏水混合，放置 24h 后在 80 ~ 90℃的水浴中加热并不断搅拌 2 ~ 3h，然后将碳酸钠慢慢加到完全膨胀的干酪素水溶液中，再加入乙醇、甘油搅拌均匀即可。

用法：将手洗净后浸入上述配好的溶液中，然后提出，边晾干边伸张手指关节处，约 10min 左右成膜即可工作。

② 防护乳剂：主要用于防止脂溶性化学物质的刺激侵入。

配方：三乙醇胺　2g
　　甘油　5g
　　硬脂酸　15g

羊毛脂 2g
对羟基苯甲酸乙酯 0.1g
白凡士林 25g
蒸馏水 加至100g

配制：将上述原料准确称量，强烈搅拌均匀，使之成为乳状液即可使用。还可根据要求适当加入二氧化钛（5%）和奎宁（3%）等药物。

③ 防护膜：主要用于防止脂溶性化学物质的侵入。

配方：氢氧化钾 0.6g
硬脂酸 8g
单硬脂酸甘油酯 1g
明胶 2g
淀粉 4g
羧甲基纤维素钠 1.5g
甘油 5g
对羟基苯甲酸乙酯 0.1g
蒸馏水 加至100g

配制：将明胶、淀粉、羧甲基纤维素钠、硬脂酸和蒸馏水放在烧杯中，在水浴上加热至全溶后，在搅拌下加入氢氧化钾，最后加入甘油、单硬脂酸甘油酯和对羟基苯甲酸乙酯，搅拌均匀即可。

9.6.3 燃烧与爆炸

1. 粘接中常见的易燃易爆品

在粘接中，从工件清洗、配制粘合剂到加温固化都要用到化学药品，其中一些是易燃易爆品，这些材料见表9-12。

表9-12 粘接中常见的易燃易爆品

类别	品 种	作 用
易燃液体	汽油、酒精、丙酮、苯、甲苯、醋酸乙酯、醋酸丁酯、苯乙烯及各种有机单体	粘合剂溶剂、清洗剂及单体、固化剂
易燃固体	邻苯二甲酸酐、顺丁烯二酸酐等	环氧树脂固化剂
爆炸品	硝基胶等	粘合剂
遇水燃烧品	金属钠等	氟材料表面处理剂
氧化剂	过氧化二苯甲酰、过氧化环己酮等	引发剂

在粘接中，用量最大的是各种易燃液体。粘接中发生的火灾、爆炸事故，多数是由于使用易燃液体不当或未按安全操作规程施工而引起的。因此，在粘接操作中注意防止易燃液体着火、爆炸是非常重要的。粘接中常用易燃液体性能见表9-13。

表 9-13 粘接中常用易燃液体性能

易燃液体	沸点/℃	闪点/℃	自燃点/℃	爆炸浓度（%）
酒精	78. 4	14	510 ~ 568	3. 5 ~ 18
汽油	50 ~ 150	10 ~ 58	415 ~ 530	1. 0 ~ 6. 0
苯	78 ~ 80	14	580	1. 5 ~ 9. 5
甲苯	110. 7	6 ~ 10	552	1. 2 ~ 7
丙酮	56	10	570	2. 5 ~ 12. 8
环己酮	155. 6	63. 9	—	—
苯乙烯	146	38	490	1. 1 ~ 6. 1
醋酸乙酯	71. 8 ~ 73	7	426	2. 6 ~ 13. 4
醋酸丁酯	126	22	415	1. 7 ~ 7. 6

2. 引起爆炸起火的原因

（1）明火　烟头、未灭的火柴、喷灯、电炉和电烘箱以及金属工具撞击产生的火花等，具有很高的温度和热量，都能引起易燃物品着火和爆炸。如电烘箱是粘接工作最常用的设备之一，用它烘烤刚刚用有机溶剂清洗的有吸附性的工件，由于溶剂大量挥发使箱内溶剂浓度超过爆炸最低浓度，发生爆炸事故。

（2）电气设备引起的火灾　粘接使用的电气设备因接线错误，熔体丝熔断，电线负荷过大及电线破损等原因引起周围的易燃物着火，因此所用电气设备应有防火防爆措施。

（3）静电引起的火灾　静电是不导电物质之间相互摩擦而产生的电荷。当电压过高或正负电荷相遇时，会出现放电现象而产生电火花，进而引起周围易燃品着火。这种现象在北方干燥季节较容易发生。

粘接中使用的绝大部分粘合剂及其溶剂都是非导电体，因而一旦相互摩擦就容易带电并产生电火花，引起易燃品着火。

3. 安全措施

（1）选用不含易燃溶剂的粘合剂　这是最根本的防火防爆措施，如采用近年来发展较快的热熔胶和水乳胶，基本上可以消除火灾事故。此外，被粘工件的表面处理应采用喷砂、化学清洗、活化等非有机溶剂清洗法。

（2）正确使用烘烤设备　电烘箱是粘接必用的设备，使用时要按操作规程正确使用。尤其是烘烤带少量易燃溶剂的工件时，要在工件放入烘箱的若干时间内敞开箱门，在烘烤过程中打开上部通风机。

（3）室内电气设备要有防火防爆措施　粘接工作室的各种电气设备包括照明灯，应有防火防爆措施。

（4）防止静电产生　在干燥天气工作时，特别要注意防止易燃物品发生相互摩擦，必要时可使用金属导线，将电荷引入地下。

（5）加强通风排风　粘接工作室内加强通气排风，不但可以使工作人员免除毒物的危害，也可以减低易燃品的浓度，减小易燃品着火爆炸的可能性。

第 10 章　涂　　料

10.1　概述

涂料（旧称油漆），它是一种有机高分子胶体的混合物，涂料涂布在物体表面能形成一层附着坚牢的涂层，使得物体得以保护或色彩得以完美。

10.1.1　涂料的作用

（1）保护作用　涂料涂敷在产品表面所形成的薄膜能将产品表面与空气、水分和其他如酸、碱、盐、二氧化硫等腐蚀介质隔离开，有效防止锈蚀和腐朽，同时可减轻产品受摩擦和冲击的程度，起到一定的机械防护作用。因此涂料对产品增加使用功能和延长使用寿命具有重要的作用。

（2）装饰作用　涂料工业可以根据产品的需要配成各种色彩鲜艳、光亮美观的涂料。涂料品种中还有各种美术漆，如锤纹漆、桔纹漆等，在产品表面涂饰之后，可以形成各种美丽的花纹。所以涂料不仅有保护产品的作用，而且可以改善产品原来的颜色、光泽和质感，赋予产品以美丽的外观。

（3）伪装作用　在国防工业中，也常用涂料伪装。这些伪装色主要是源于自然色，使产品的隐蔽性能好。

（4）标识作用　许多产品也常用各色涂料来作为标志。如红色为废品，黄色为次品，白、兰、绿色代表合格品。各种化学品、毒品，各种生产设备或控制设备，为了避免中毒和操作错误，也常涂上各色涂料作标志。此外、道路划线以及交通信号也都采用有色涂料作为标识。目前，国际上应用涂料作为标识色彩已逐渐标准化。

（5）其他用途　涂料还有许多特殊用途。例如海轮、舰艇的船底，涂一层防污漆，用以驱散或杀死海生物，使之不再附着船底，从而保持航速和延长船舰的使用寿命。再如宇宙飞船、高速飞机等需要各种绝热、防辐射和防微粒摩擦冲击等一系列特殊涂料加以保护，电机电器工业需各种绝缘涂料，电子产品需导电涂料，雷达需吸收雷达波的涂料，医院手术室长期用的杀菌涂料，发动机和锅炉的耐高温涂料，以及发光和示温涂料等。

10.1.2　涂料的组成、分类与表示法

涂料一般由可挥发部分和不挥发部分组成。当涂料涂覆在包装容器的表面后，

其可挥发部分逐渐挥发逸去，留下不挥发部分固结成膜，所以不挥发部分称成膜物质。成膜物质又可分为主要成膜物质、次要成膜物质和辅助成膜物质三类。主要成膜物质可以单独成膜，也可以与颜料等次要成膜物质共同成膜。涂料的组成见表10-1。

表 10-1　涂料的组成

组　分		
主要成膜物质	油料	植物油：桐油等
	树脂	天然树脂：虫胶、松香、天然沥青等 合成树脂：酚醛树脂、环氧树脂、丙烯酸酯等
次要成膜物质	颜料	无机颜料：钛白粉、氧化锌等 有机颜料：酞菁蓝等 防锈颜料和体质颜料：红丹、硫酸钡、滑石粉、碳酸钙等
辅助成膜物质	助剂	增塑剂、催干剂、固化剂、防霉剂、乳化剂、润滑剂等
挥发物质	溶剂和稀释剂	二甲苯、乙酸乙酯、乙酸丁酯、丁醇等

由于涂料的品种不同，其组成功能也不同。如罩光清漆就是不加颜料和体质颜料的透明体；而腻子则是加入大量体质颜料的稠厚状浆体；色漆是加入适当颜料和体质颜料的不透明体。

我国对涂料的分类是采用以成膜物质为基础的分类方法。即按在成膜物质中起决定作用的一种成分为基础，作为分类的依据。涂料和膜物质分类见表10-2，辅助材料分类编号见表10-3，部分涂料的基本名称及代号见表10-4。

表 10-2　涂料和膜物质分类

序号	代号	发音	涂料类别	成膜物类别	主要成膜物	备注
1	Y	衣	油脂漆类	油脂	天然动植物油、合成油	
2	T	特	天然油脂漆类	天然油脂	松香及其衍生物、虫胶火漆	包括天然的和加工处理的
3	F	佛	酚醛树脂漆类	酚醛树脂	纯酚醛树脂、改性酚醛树脂	
4	L	肋	沥青漆类	沥青	天然沥青、石油沥青、煤焦沥青	
5	C	雌	醇酸树脂漆类	醇酸树脂	甘油醇酸树脂、季戊四醇酸树脂、改性醇酸树脂	
6	A	啊	氨基树脂漆类	氨基树脂	尿醛树脂、三聚氰胺甲醛树脂、聚酰亚胺树脂	
7	Q	欺	硝基漆类	硝基纤维		
8	M	摸	纤维素漆类	纤维脂、纤维醚	乙基纤维、苄基纤维、醋酸纤维	
9	G	哥	过氯乙烯漆类	过氯乙烯树脂	过氯乙烯树脂	

（续）

序号	代号	发音	涂料类别	成膜物类别	主要成膜物	备注
10	X	西	乙烯树脂漆类	烯类树脂	乙烯共聚树脂、聚醋酸乙烯共聚树脂，聚二烯基乙树脂	
11	B	玻	丙烯酸漆类	丙烯酸树脂	丙烯酸树脂、丙烯酸共聚脂	
12	Z	资	聚酯漆类	聚酯树脂	饱和聚酯树脂、不饱和聚酯树脂	
13	H	喝	环氧树脂漆类	环氧树脂	环氧树脂、改性环氧树脂	
14	S	思	聚氯酯漆类	聚氨基甲酸酯	聚氨基甲酸酯	
15	W	屋	元素有机漆类	元素有机聚合物	有机硅等元素有机聚合物	
16	J	基	橡胶漆类	橡胶	天然橡胶、合成橡胶及其衍生物	
17	E		其他漆类	其他	以上十大类未包括的成膜物质，如无机高分子材料等	
18			辅助材料		稀释剂、防潮剂、催干剂、脱漆剂、固化剂	

表 10-3　辅助材料分类编号

序号	代号	名称	序号	代号	名称
1	X	稀 释 剂	4	T	脱 漆 剂
2	F	防 潮 剂	5	H	固 化 剂
3	G	催 干 剂			

表 10-4　部分涂料的基本名称及代号

代号	基本名称	代号	基本名称	代号	基本名称
00	清油	14	透明漆	61	耐热漆
01	清漆	15	斑纹漆、裂纹漆、橘纹漆	62	示温漆
02	厚漆	19	闪光漆	66	光固化漆
03	调和漆	24	家电用漆	77	内墙涂料
04	磁漆	23	罐头漆	78	外墙涂料
05	粉末涂料	26	自行车漆	79	屋面防水涂料
06	底漆	50	耐酸漆、耐碱漆	80	地板漆、地坪漆
07	腻子	52	防腐漆	86	标志漆、马路划线漆
09	大漆	53	防锈漆	98	胶液
11	电泳漆	54	耐油漆	99	其他
12	乳胶漆	55	耐水漆		
13	水溶性漆	60	防火漆		

10.2　涂料用油及天然树脂和人造树脂

10.2.1　涂料用油

在涂料工业中，油是最早使用的成膜物质，目前，油仍是油性涂料和油基涂料的主要成膜物质。

1. 油的组成

油（在涂料工业中主要使用植物油）的主要成分是甘油三脂肪酸酯，其通式如下：

$$\begin{array}{l} CH_2\text{—}OOC\text{—}R_1 \\ | \\ CH\text{—}OOC\text{—}R_2 \\ | \\ CH_2\text{—}OOC\text{—}R_3 \end{array}$$

式中，R_1、R_2、R_3 分别表示脂肪酸的烃基部分。R_1、R_2、R_3 可以相同，也可以不同。此外，油中尚有少量磷脂、固醇、色素等杂质，它们对涂料的制备有害，必须除去。

脂肪酸是一系列同系物的总称，结构中含有双键的称不饱和脂肪酸，不含双键的称饱和脂肪酸。常见的饱和脂肪酸有：

月桂酸（十二酸）$C_{11}H_{22}COOH$

豆蔻酸（十四酸）$C_{13}H_{27}COOH$

软脂酸（十六酸）$C_{15}H_{31}COOH$

硬脂酸（十八酸）$C_{17}H_{35}COOH$

常见的不饱和脂肪酸有：

油酸（十八碳烯 -9 - 酸）

$CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7-COOH$

亚油酸（十八碳二烯 -9，12 - 酸）

$CH_3(CH_2)_4CH=CHCH_2CH=CH(CH_2)_7-COOH$

亚麻酸（十八碳三烯 -9，12，15 - 酸）

$CH_3CH_2CH=CHCH_2CH=CHCH_2CH=CH(CH_2)_7-COOH$

桐油酸（十八碳三烯 -9，11，13 - 酸）

$CH_3(CH_2)_3CH=CHCH=CHCH=CH(CH_2)_7-COOH$

蓖麻油酸（12 - 羟基十八碳烯 -9 - 酸）

$$CH_3(CH_2)_5\underset{\displaystyle OH}{\underset{|}{C}}HCH_2CH=CH(CH_2)_7COOH$$

自然界的一切油脂均是由几种脂肪酸组成的混合甘油酯。

2. 油的成膜性与分子结构的关系

油脂分子中的双键，使其具有较强的反应能力，最常见的反应是与空气中的氧发生氧化反应。也能打开双键发生聚合反应，使油分子相互结合，分子不断扩大，这些大分子又逐渐结合成网状结构，以致不能自由移动，形成固体涂膜。油的氧化聚合反应十分复杂，可生成过氧化物，产生双键转移，发生聚合反应。

因此，将干性油涂在物体表面时，通过不饱和脂肪酸的一系列氧化聚合反应，涂层会逐渐干燥成膜。油的成膜难易与其分子中的双键数目及双键的排列方式有关，含双键越多，结膜越快；双键成共扼结构的，比双键为间隔形式的结膜快。

在工业上用碘值这一指标区分油的干燥性能，碘值指 100g 油所能吸收碘的克数。碘值是测定油的不饱和度的主要方法，根据干燥性能和碘值，可以把涂料用油分为干性油、半干性油和不干性油三种。

干性油的碘值在 140 以上，油分子中的平均双键数超过 6 个。这种油在空气中易氧化干燥成几乎不溶于有机溶剂、加热不软化的油膜。常用的干性油有桐油、亚麻仁油、梓油和苏籽油。

半干性油的碘值约为 100 ~ 140，平均双键数在 4 ~ 6 之间，这种油在空气中能干燥成膜，但速度慢，涂膜软，加热时可软化及熔融，易溶于有机溶剂中。属于这一类油的有豆油、玉米油、棉籽油、葵花籽油等。

不干性油的碘值在 100 以下，平均双键数在 4 个以下，在空气中不能氧化干燥成膜。不干性油有蓖麻油，花生油等，它们可作合成树脂的催化剂。有的不干性油经化学改性可变成干性油。如在高温及酸催化剂作用下，蓖麻油可脱去一分子水，由原来的蓖麻油酸结构转变为亚油酸结构，即成为具有较好性能的干性油。

10.2.2　涂料用天然树脂和人造树脂

1. 虫胶

虫胶俗称漆片，是紫胶虫分泌物经加工精制得到的片状天然树脂，颜色从半透明的浅黄色到几乎不透明的暗红色，软化点 40 ~ 50℃，熔点 77 ~ 90℃。

虫胶最好的溶剂是低级醇（乙醇、甲醇等），也溶于低级羧酸，完全或部分溶于丙酮、乙醛、丁醛或醚中。不溶于脂肪烃、芳烃及卤代烃溶剂中。

将虫胶溶于酒精中，可制得虫胶清漆。它的成膜过程是溶剂挥发的物理过程，因此干燥迅速。虫胶涂膜坚硬、光亮，但遇水变白。

2. 大漆

大漆是由漆树树脂制得，其主要成分是漆酚，在大漆中，漆酚含量越高，质量越好。

大漆可用汽油、二甲苯等溶剂稀释，靠漆酚形成极复杂的网状结构成膜。其涂膜坚硬、富有光泽，附着力强，耐久、耐磨、耐酸、耐溶剂。缺点是色深，性脆，粘度高，不易施工，干燥速度慢，干燥时气味易引起人体过敏。过去主要用作木器涂料，现在在防化学腐蚀方面应用很广。

3. 沥青

沥青为黑色硬质热塑性物质或无定形的粘稠状物质，可溶于四氯化碳、三氯甲烷等有机溶剂。成分极其复杂，根据来源不同分为天然沥青、石油沥青和焦油沥青三种。

沥青具有耐水、耐酸、耐碱、电气绝缘性好等特点，且资源丰富，成本低，生产简单，常用做各种涂料的成膜物质。

沥青可用植物油改性，以提高涂膜的柔韧性、耐气候性、耐溶剂性等。沥青还可以与其他树脂合用。为便于施工，可加溶剂稀释。可制作防水涂料、防腐涂料、金属保护涂料及电气绝缘涂料等。

4. 松香及其衍生物

松香能溶于多种溶剂中，并能和油混溶。它与油合用，能提高涂膜的光泽和硬度。但它的软化点低，使涂膜发粘。因为松香的主要成分是松香酸，易与碱性颜料发生作用。又由于松香结构中有双键和羧基，松香制成的涂膜耐水性和耐气候性不好。所以在现代涂料工业中一般不直接使用松香，而是使用松香的衍生物或改性松香。如松香甘油酯、季戊四醇松香酯、顺丁烯二酸酐松香酯等。以降低酸值，提高硬度，改进抗耐性。

5. 纤维素衍生物

（1）纤维素酯　将纤维素用无机酸（如硝酸）或有机酸（如乙酸、丙酸、丁酸）酯化，可制得硝酸纤维素、醋酸纤维素、丙酸纤维素等。

在纤维素酯中，应用最多的是硝酸纤维，其酯化度随硝化条件而改变。工业上以含氮的百分数表示硝化程度。用作涂料的硝酸纤维含氮量在 11.2% ~12.4% 、粘度在 0.2 ~200s 之间，其中最常用的是 0.5s 的，它的耐久性、强度和弹性都较好。

涂料用硝酸纤维，一般都加乙醇或丁醇作稳定剂，避免爆炸。硝酸纤维素能与松香树脂、醇酸树脂、氨基树脂、丙烯酸树脂、乙烯类树脂等混溶。它能溶于酯类、酮类溶剂，不溶于醇类、苯类等溶剂。

（2）纤维素醚　纤维素羟基上的氢原子被取代，得到纤维素醚。常用取代基有甲基、乙基、苄基、丙烯基、羟乙基、羧甲基等，如用氯乙烷和碱与纤维素进行醚化反应可制得乙基纤维素。乙基纤维素能形成坚硬的薄膜，在低温下仍能保持其挠曲性，在涂料中作主要成膜物质，并可用于塑料，油墨及粘合剂等。

纤维素酯和纤维素醚都是热塑性高分子化合物，可选用适当的溶剂制得较好的挥发性涂料。

10.3　涂料用合成树脂

10.3.1　涂料用合成树脂的特点

1. 涂料用合成树脂的相对分子质量

从理论上看，聚合物的相对分子质量高，材料的力学性能及耐老化、耐蚀性也

好。但是从涂料的应用、施工特点来看，还要考虑到树脂的溶解性、相容性、粘度大小和对颜料的润湿性等因素，相对分子质量过高会带来不利的影响。一般来说，供制作挥发型涂料的热塑性树脂（特别是分散性体系），如纤维素漆、乙烯类树脂漆、丙烯酸树脂漆和橡胶类漆等，其聚合物相对分子质量可高些，但也比塑料、橡胶或纤维的相对分子质量低。而对于热固性树脂，如环氧树脂、聚氨酯等，则在施工前首先合成较低相对分子质量的预聚物，施工后通过预聚物间的官能团反应进行固化交联，交联密度的大小对漆膜的耐水性、耐溶剂性和硬度等性能有很大影响。

2. 涂料用合成树脂的结构

在分子链中引入不对称苯环，可以提高玻璃化温度，从而提高漆膜硬度，但含苯环的树脂不耐光易泛黄。所以，双酚 A 环氧树脂漆易粉化，而脂环族环氧树脂的耐候性好。脂肪族聚氨酯在耐候性方面也要优于芳香族聚氨酯。

在聚合物的分子结构中引入极性基团，有助于提高涂料的附着力。同时，在分子链上含有官能团如羟基、羧基、氨基等，可提高漆膜的交联密度。

由于涂料树脂大都要求透明，并有一定的柔韧性，因此结晶结构往往是不利的，常利用共聚或其他方法来避免涂料在成膜过程中发生结晶现象。

10.3.2　涂料用合成树脂的品种

1. 涂料用天然橡胶衍生物及合成橡胶

天然橡胶衍生物及合成橡胶是橡胶涂料的主要成膜物质，具有优良的耐水性和耐化学腐蚀性，特别具有优良的耐碱性。

（1）氯化橡胶　将天然橡胶塑炼后，制成溶液，在催化剂的存在下，通氯气氯化即可制得氯化橡胶。氯化后的产物极性增加，涂膜的附着力增强，溶解性得到改善。氯化程度不同，产物的含氯量也不同。涂料用氯化橡胶的含氯量为 65% ~ 68%，主要是三氯化物和四氯化物的混合聚合物。

氯化橡胶为白色粉末或细片状松软固体，能溶于芳香族烃类、氯代烃类、酯类、酮类溶剂，不溶于水、酒精及石油溶剂。

氯化橡胶涂料有很多优良性能，它的涂膜坚硬、稳定、耐酸、耐碱、耐霉菌、涂膜的水蒸气渗透性低，耐久性好，干燥快。并能与其他树脂有较好的相溶性，故可将其加入到其他涂料中，以减少涂膜干燥时间，增加硬度，提高耐磨性和耐候性。

（2）环化橡胶　在催化剂的存在下，天然橡胶的苯溶液可制得环化橡胶。环化橡胶是白色粉末，软化点 120 ~ 140℃，可溶于煤焦油和石油溶剂等，不溶于乙醇。

环化橡胶常用来改进油性清漆的耐光性、耐热性、耐酸碱性，用作防腐漆及皮革漆。

（3）丁苯橡胶　由丁二烯和苯乙烯共聚制得，当聚合物中丁二烯含量高时，涂膜较软；苯乙烯含量高时，涂膜较硬。丁苯橡胶树脂色淡黄，能溶于芳烃、酮、

酯类溶剂。涂膜透明，耐酸碱、耐水、耐醇和植物油。耐磨性极好，干燥速度快。

溶液型丁苯橡胶，可制成防腐涂料、纸张涂料、金属底漆等。

2. 涂料用酚醛树脂

酚醛树脂由酚类和醛类缩聚而成。通常所用的酚类有苯酚、甲酚、二甲酚、双酚 A 等，醛类有甲醛、糠醛等。最初用苯酚和甲醛缩合制备涂料酚醛树脂，按照反应体系内的苯酚和甲醛的比例不同及反应介质 pH 值的不同，可分别制成热塑性或热固性酚醛树脂，酚醛树脂类型与反应条件关系见表 10-5。

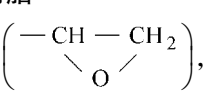
表 10-5　酚醛树脂类型与反应条件关系

树脂类型	甲醛/苯酚（摩尔比）	介质 pH 值
热塑型	5/6 或 6/7	<7
热固型	7/6	>7

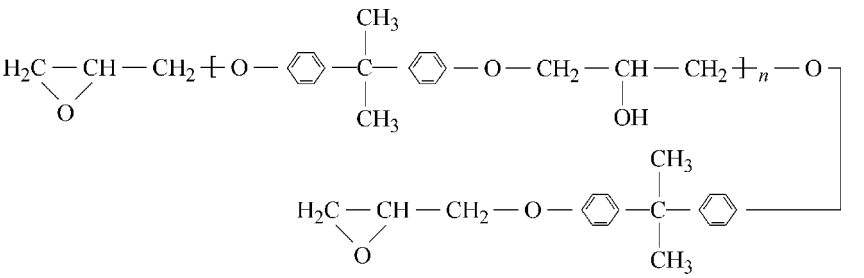
苯酚与甲醛缩合得的树脂，具有优异的耐酸碱，耐腐蚀，耐热等性能，溶于酒精，但不溶于干性油及大多数溶剂，故只宜作为粘合剂或醇溶性清漆使用。若要求树脂有较好的油溶性，可采用邻、对位上含有三个以上碳原子取代基的酚类为原料制酚醛树脂。随着烃取代基的增加，酚的极性下降，开始具有烃的性质，从而提高了油溶性，制备油溶性酚醛树脂常用的取代酚有对叔丁酚、对异戊酚等。若用松香改性苯酚 – 甲醛缩聚树脂除可使树脂的油溶性变好外，还可使树脂性能得到改善。

油溶性酚醛树脂与松香改性酚醛树脂和油制成的涂料，具有突出的耐水、耐酸碱、耐热和耐蚀性能，后者的耐久性更好。

3. 涂料用环氧树脂

凡含有环氧基团  ，并可以树脂化的高分子化合物统称为环氧树脂。在各类环氧树脂中，应用最多的是环氧氯丙烷与双酚 A 缩聚而成的双酚 A 型环氧树脂，它又称通用环氧树脂或标准环氧树脂，简称环氧树脂。

环氧树脂的分子结构式为：



不论分子链长短，分子链的两端基本上都是环氧基。

环氧树脂是一种粘稠的液体或固体，贮存稳定性好。常温下树脂相对分子质量在 500 以下时是液体，大于 500 时则逐渐过渡到固体。

随着树脂相对分子质量的增加，树脂的溶解性下降，酮、酯、醚醇类和氯化烃

类对环氧树脂有较好的溶解能力；芳烃和醇类对树脂的溶解能力较差，但芳香烃和醇类混合后，则是中相对分子质量环氧树脂的良好溶剂。为降低成本，改善涂膜的性能和涂料的施工性能，提高溶剂的溶解能力，涂料工业常采用混合溶剂作为环氧树脂的溶剂。一般来说，环氧树脂与芳香族聚合物是混溶的，但不与脂肪族聚合物相混溶。在涂料工业中，常利用这一特点将环氧树脂和许多涂料用合成树脂并用，经高温烘烤后，交联而成性能优异的涂膜。

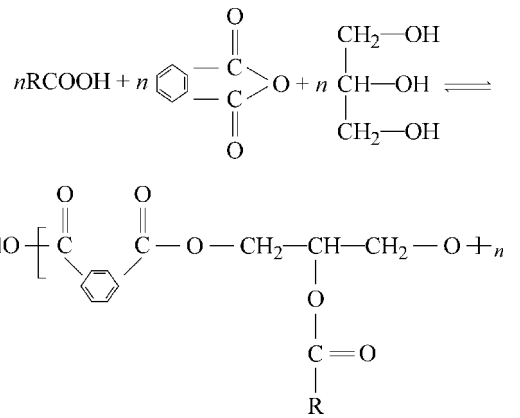
环氧树脂可以与多种合成树脂混溶，如酚醛树脂、氨基树脂、醇酸树脂等。这些树脂都含有能与环氧树脂反应的活泼基团，可与环氧树脂发生交联反应。这些树脂各具有一定的优良性能，将其引入环氧树脂中，会赋予树脂某些优良性能。如用酚醛树脂作固化剂，可以提高环氧涂膜的韧性，而且涂膜色泽变浅。合成树脂在此除起固化作用外，对涂膜还起改性作用，所以应用越来越多。

环氧树脂涂料具有很高的抗化学腐蚀性和抗热性，对金属、玻璃、陶瓷等都有极强的附着力，耐磨性极好，在包装容器用涂料尤其是罐头内壁涂料中占有重要地位。

4. 涂料用醇酸树脂

用单元酸（通常是脂肪酸）改性的多元醇与多元酸的聚酯称为醇酸树脂。

醇酸树脂由单元酸、多元酸或酸酐与多元醇共同酯化聚合而得，以最常用的单元脂肪酸、苯二甲酸酐和甘油为例：



式中 R 为脂肪酸的链烃基。这种线型分子，通过 R 基中双键的氧化聚合，进一步交联成体型大分子。

按醇酸树脂含脂肪酸（油）的多少，可把醇酸树脂分成短油度——含油 35% ~45%，中油度——含油 46% ~60%，长油度——含油 60% ~70% 和极长油度——含油 >70% 四种，其中极长油度醇酸树脂主要用于油墨及调色基料。

油度的计算方法：

$$\text{油度} = \frac{\text{油用量}}{\text{树脂的理论产量}} \times 100$$

式中树脂的理论产量等于苯二甲酸酐用量、甘油用量与脂肪酸（油）用量之和减去酯化时所生成的水的量。

醇酸树脂属于体型热固性树脂，如果用这种树脂直接制作涂料，因这种树脂性脆裂，而且不能在有机溶剂中溶解，结果涂料就无法使用。因此要使醇酸树脂在涂料中得到应用，就必须设法使它能溶解在溶剂中，解决的办法就是在醇与酸的缩聚过程中加入一个能溶于有机溶剂的物质进行共缩聚。因为干性油是三个长碳链的油酸和甘油的酯化物质，链烃在油的结构中占很大比重，因而结构相似的链烃、环烃、二甲苯就能溶解油脂。所以利用干性油和醇、酸进行共缩聚就可以使醇酸树脂溶于有机溶剂中。另一方面油作为一种成膜物质与纯醇酸共缩聚，将改变纯醇酸树脂的成膜性，如改善成膜物质的脆裂性，提高柔韧性（因为油的成膜物是柔韧的），使涂膜具有良好的弹性、耐冲击性，总之，用油改性不仅改善了醇酸树脂的不溶解性，而且提高了它的成膜性能。此外、醇酸树脂还可以与其他多种树脂配制成多种多样的涂料品种。

聚合所用油的种类和油度对醇酸树脂的性能有非常重要的影响。醇酸树脂的粘度随油度的增加而减小，而其在脂肪溶剂中的溶解度随油度的增加而增大。一般短油度醇酸树脂为硬的粘稠状，溶于二甲苯、甲苯等芳烃溶剂；中油度醇酸树脂等用芳烃和脂肪烃的混合溶剂；长油度的醇酸树脂为软的树脂状物，可溶于脂肪族溶剂。不同油度的醇酸树脂的涂膜硬度、干燥性能、韧性、附着力等也不同。

醇酸树脂可以单独制成清漆和各种色漆，涂膜干燥后，能形成高度网状结构，不易老化，耐候性好，光泽持久，涂膜有良好的附着力和弹性。也可用其他树脂如酚醛树脂、苯乙烯树脂、丙烯酸酯等改性，以改善它的耐化学药品性和耐水性。还可以与硝酸纤维、氨基树脂、环氧树脂、过氯乙烯树脂等并用，以降低这些树脂的成本，提高和改善涂料产品的性能。由于上述优点，醇酸树脂已成为涂料中产量占第一位的树脂。

5. 涂料用氨基树脂

涂料用氨基树脂是某些含氨基（—NH_2）的化合物与醛类反应，再用醇类醚化而制得的能溶于有机溶剂的树脂。

在涂料工业中，用量最多的氨基树脂是丁醇醚化的三聚氰胺甲醛树脂，其次是六甲氧甲基三聚氰胺甲醛树脂。树脂的固化方式为加热后自身固化，固化时需加热，故许多烘干型涂料都含有氨基树脂。它的特点是色浅，几乎接近水白色，涂膜光亮坚硬、耐水、耐碱但涂膜有些过分坚硬而发脆，附着力差。所以氨基树脂很少单独使用，常与醇酸树脂、丙烯酸树脂、环氧树脂、有机硅树脂等混用。

6. 涂料用丙烯酸树脂

用丙烯酸酯或丙烯酸类单体所制得的聚合物统称丙烯酸树脂，在涂料工业中，

可采用热塑性和热固性两类丙烯酸树脂。丙烯酸树脂涂料具有以下优点：色浅，一般可以达到水白程度，且透明度极高，耐光、耐候、户外曝晒耐久性好，紫外线照射后不易分解或泛黄；能耐酸、碱、盐和洗涤剂的作用，防潮防霉性好。使用温度范围宽，如热塑性丙烯酸酯树脂在较高温度下软化，冷后可复原，热固性树脂在170℃下不分解，不变色。

7. 涂料用乙烯类树脂

乙烯类树脂是由含有 $CH_2=CHX$（其中 X 不是烷基）基础结构的一些单体（如氯乙烯、醋酸乙烯、偏氯乙烯、过氯乙烯等）聚合或共聚而得。乙烯类树脂涂料具有耐候性好，耐水性、防霉性、柔韧性好的优点，且快速自干，广泛用在纸包装，食品包装等领域中。

8. 涂料用聚氨酯树脂

聚氨酯树脂由多异氰酸酯与多元醇聚合而成，全称为聚氨基甲酸酯，其结构为：

$$+\mathrm{RNH-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-O-R'-O-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-NH}+_n$$

由于聚氨酯分子中具有强极性的氨基甲酸酯基团，所以聚合物具有高强度、耐磨、耐溶剂等特点。聚氨酯涂料的固化温度范围宽，有在 0℃时能正常固化的室温固化漆，也有在高温下固化的烘漆。涂膜附着力好，柔软有弹性，有较全面的耐化学药品性，并可与多种树脂并用制成性能优良的高级涂料。

10.4　涂料的次要成膜物质和辅助成膜物质

10.4.1　次要成膜物质

次要成膜物质就是涂料的各种颜料，颜料与主要成膜物质不同，它不能离开主要成膜物质单独成膜。但涂膜中有了颜料，可以使许多性能得到改善，满足更多的要求。

颜料是一种微细的有色粉末状物质（体质颜料除外），它不溶于水或油介质中，而能均匀地分散在介质中，涂于物体表面形成色层。

在涂料行业中，对颜料有如下要求：

1）具有适当的遮盖力。

2）具有鲜明的颜色和着色力。

3）应具有高分散度。

4）化学性质稳定，不易老化变色。

颜料在涂料中能赋予涂膜以颜色、遮盖力、力学强度、抗耐性、耐候性及对金

属底材的防腐性和其他特殊功能，颜料可分为无机颜料与有机颜料两类。在涂料中，主要使用无机颜料，而有机颜料多用于装饰性涂料。若按作用分，颜料可分为以下三种。

（1）着色颜料　能赋予涂料五彩缤纷的颜色和色调，遮盖被涂物表面，并能改善涂膜的耐久性、耐候性和耐磨性。

涂料常用的无机颜料有钛白粉、锌钡白、铅铬黄、镉黄、铬绿、铁蓝、群青、铁红、炭黑等。与无机颜料相比，有机颜料颜色齐全，色泽鲜艳，着色力较强，但遮盖力较差。常用的有机颜料有耐晒黄、联苯胺黄、酞菁绿、酞菁蓝、甲苯胺红等。

（2）防锈颜料　是用于保护金属底材免受锈蚀的颜料，有盐类和金属类两种类型。

无机盐类具有缓蚀性，含有用水可浸出的阴离子，能钝化金属表面或影响腐蚀过程。它们主要是含铅和铬的盐类，此类颜料主要有碱式硅铬酸铅、铅酸钙、红丹、四盐基铬酸锌等。

有 4 种金属材料可做涂料用颜料，即铝、不锈钢、铅和锌。其中铅常与亚麻仁油配合，在涂料中形成铅皂，锌粉做富锌保护底漆，都可发挥光蚀阳极的作用。不锈钢颜料不但具有防腐功能，还有装饰作用。铝粉因表面存在氧化铝膜而具有保护作用。特别是一种叶展型铝粉，能在漆膜表面发生定向排列，起到隔离大气的作用，同时还具有光蚀性阳极的作用。

（3）体质颜料　是不溶于涂料的助剂，它对漆膜几乎没有遮盖力和着色力，但能提高漆膜的厚度，改进液体涂料的流动性及漆膜的力学性能、渗透性、光泽性和流平性，并能降低成本。

常用的体质颜料有硫酸钡、高岭土、云母、滑石粉、碳酸钙等。

10.4.2　辅助成膜物质

1. 溶剂

涂料的成膜物质大多数是固体，不能直接施涂于物体表面，溶剂可使成膜物质变成稀薄的液体，便于均匀地涂在物体表面，待溶剂全部挥发掉，便形成均匀的涂膜。溶剂虽然最后并不存在于涂膜中，但溶剂选择是否得当，对涂料的制备、贮存、施工特性、干燥时间、最终涂膜特性等都有很大影响。因此，在选择溶剂时，既要考虑溶剂对涂料用树脂的溶解性及挥发速度、表面张力等性质，又要兼顾溶剂的价格、毒性及对人体的刺激性。

涂料中常用的溶剂有以下几种：

（1）烃类溶剂

溶剂汽油：简称溶剂油，主要为烷烃。涂料工业常用的是 145 ~ 200℃范围的馏出物。它的挥发性低，能溶解大多数天然树脂、油性树脂及中至长油度醇酸树脂，常用作涂料的主溶剂。

甲苯：是硝基漆稀释剂中常用的溶剂，也可作乙烯基漆和氯化橡胶漆的混合溶剂。

二甲苯：具有良好的溶解性和中等蒸发速率，广泛用作醇酸树脂、乙烯基树脂、氯化橡胶和聚氨酯的溶剂，是涂料中用量较大的一种溶剂。

（2）醇类和醚类溶剂

乙醇：能溶解虫胶清漆，也能做聚乙烯醇缩丁醛或硝基漆的混合溶剂。

正丁醇：蒸发速率低，是多种油类和树脂的溶剂，特别适宜做氨基树脂和丙烯酸树脂的溶剂，也可用做硝基纤维素的溶剂。

乙二醇－乙醚：即 2－乙氧基乙醇，属挥发性较慢的溶剂，常用于不能加入烷烃（如溶剂油）的涂料配方中。

（3）酯类和酮类溶剂

丙酮：是挥发快、溶解力强的溶剂，多用做乙烯基共聚物和硝酸纤维素溶剂；也可适量地与多种溶剂掺和，以改进施工和漆膜性能。

甲乙酮：是蒸发速率快的强溶剂，广泛用于乙烯基共聚物、环氧树脂和聚氨酯树脂。常与溶解力低的溶剂共用，以改进涂料的施工性能与成膜性能。

甲基异丁基酮的用途与甲乙酮相似，常用做挥发性较慢的溶剂。

乙酸乙酯：是蒸发速率较快的酯类溶剂，有令人愉快的水果香味，它优于有刺激性气味的酮类溶剂，最初主要用于硝基纤维素漆，现在使用较为广泛，其溶解力低于酮类溶剂。

乙酸丁酯：属于常用的中等蒸发速率的酯类溶剂，可用做多种合成树脂的溶剂。

2. 助剂

涂料用助剂，尽管其中有的用量很少，但对涂料的质量、成膜过程及最终涂层的性能有很大影响，有时甚至可起关键作用。同时，某些助剂对施工性能也有重要影响。常用的助剂有以下几种：

（1）催干剂　也称干燥促进剂，俗称干料，在氧化聚合干燥的涂料体系中，能大大缩短涂膜干燥时间。催干剂之所以能加速涂膜的干燥速度，是因为它能促进涂膜中的油和树脂的氧化聚合速度，加速交联固化。

常用的催干剂有环烷酸、辛酸、松香酸的铅盐、钴盐和锰盐。使用时常将几种催干剂配合使用，以获得最佳效果。由于铅具有毒性，故不能用于制造食品罐头的包装涂料中。

（2）增塑剂　可降低树脂的玻璃化温度，从而起到影响漆膜的抗拉强度、韧性、伸长率、渗透性和附着力的作用。在涂料中加入增塑剂，能改善涂膜的韧性、耐寒性，提高附着力，克服了涂膜的硬脆及易裂的缺点，但同时也使涂膜的耐热性、硬度变差。

常用的增塑剂有氯化石蜡、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二辛酯等。

（3）抗结皮剂　涂料在容器内会结皮，因而使用涂料时增加了过滤工序并造成损耗。含干性油的涂料通常最易结皮，这时可使用抗结皮剂，抗结皮剂一方面要阻止氧化作用，防止结皮，同时又不得影响干燥时间，所以最好是挥发性化合物，在涂装以后，其作用就随它的挥发而消失，不致影响以后干燥成膜作用的进行。有效的抗结皮剂有二戊烯、甲基苯二酚等。

（4）润湿剂　使用某些活化剂做润湿剂，能增加漆料对颜料的润湿能力，减少制备涂料的研磨时间，确保颜料和体质颜料的均匀分散。

（5）稳定剂　可防止涂膜遇热、光分解，提高涂膜的耐久性。用得最多的是钙、铅、钡等的硬脂酸盐，它们是耐热又耐光的稳定剂。

10.5　常用涂料

10.5.1　酚醛树脂涂料

酚醛树脂涂料（也称为酚醛漆）的主要成膜物质是酚醛树脂，属于磁漆类。用作涂料的酚醛树脂主要有两种类型：松香改性酚醛树脂和油溶性酚醛树脂。

松香改性酚醛树脂是将酚醛树脂与松香、甘油共煮。其目的是为了使树脂能很好地与油共溶。所谓油溶性酚醛树脂是将纯酚醛树脂直接溶于油中，然而不是所有纯酚醛树脂都能溶于油，只有用对－苯基苯酚、对－环己酚、对－叔丁基苯酚、对戊基苯酚制得的酚醛树脂才可以。

以松香改性酚醛树脂或油溶性酚醛树脂和干性油构成酚醛树脂涂料的主要成膜物质，在此基础上加入不同种类的溶剂、催干剂、颜料等可制成各种类型的酚醛树脂涂料，如酚醛清漆、各色磁漆、底漆、防锈漆等。

根据酚醛树脂与油的比例不同，又可分为短、中、长三种油度的涂料。油度对酚醛树脂性能的影响见表 10-6。

表 10-6　油度对酚醛树脂性能的影响

油度	树脂∶油	性 能 对 比	用途
短油度	1∶2 以下	干燥快，漆膜硬而脆，光泽较好，但耐候性差	室内用
中油度	1∶2 ~ 3	介于长、短油度之间	室内外均可
长油度	1∶3 以上	干燥慢，漆膜好，附着力好，但不易打磨	室内外均可

用于酚醛树脂涂料的干性油最好是桐油，其次是胡麻油。

酚醛树脂涂料的溶剂常用的是松香水（也称 200 号溶剂汽油）和松节油。

酚醛树脂涂料通常采用环烷酸（萘酸）的金属皂作为催干剂。在磁漆中因为颜料对催干剂有吸附作用，因此使用量要多一些。如炭黑对钴催干剂就有吸附作

用。各种催干剂配合使用比单纯使用一种催干剂效果要好，它们之间可以取长补短，如铅催干剂稳定性不良，加入钙可以防止铅的沉淀，铅是很强的表面干燥剂，加入锌可以阻止表面干燥，维持表面空隙，使氧气能够继续渗透。这样反而促进了整体的干燥。

酚醛树脂漆一般固体含量约占 50%，粘度为 60～90，在常温下可干燥。

酚醛树脂涂料的耐水性、耐酸性、光泽都比较好，漆膜附着力强。漆膜坚硬，一般说来短油度比长油度坚硬而脆，磁漆比清漆户外耐久性要好。缺点是耐候性比醇酸涂料差。表 10-7 列举了各种磁漆的技术指标。

表 10-7　各种磁漆的技术指标

检验目标	酚醛磁漆	醇酸磁漆	氨基烘漆
漆膜颜色及外观	平整光滑	平整光滑	平整光亮
细度(刮板细度计)/μm	≤30	≤20	≤20
粘度(涂－4)/(Pa·s)	70～110	60～160	30～70
遮盖力　红色/(g/m^2)	≤160	≤140	≤140
黄色/(g/m^2)	—	≤150	≤150
灰色/(g/m^2)	≤70	≤55	≤55
蓝色/(g/m^2)	≤80	≤80	≤80
绿色/(g/m^2)	≤70	≤55	≤50
黑色/(g/m^2)	≤40	≤40	≤40
白色/(g/m^2)	—	≤110	≤110
干燥时间　表干/h	≤6	≤5	≤2
实干/h	≤18	≤15	≤2
柔韧性/mm	1	1	1
冲击强度/(N·m)	490	490	490
光泽(光电光泽计)(%)	待定	≥90	待定
附着力、级	≤2	≤2	≤2
耐水性（浸入 25℃蒸馏水中）	2h 保持原状、附着力不减	5h 允许轻微发白、失光 2h 内恢复	60h 允许轻微变化、3h 内恢复
耐汽油性	—	不起泡、不起皱	不起泡、不起皱

酚醛树脂涂料主要用在建筑工程、交通工具、机械设备及室内外一切木材、金属表面上。短油度耐候性差，只能用于室内，长油度则室内外都可用。酚醛清漆用于涂饰木器可显示出木器的底色及花纹，也可用于粘合层压制品。酚醛底漆有良好

的附着力和防锈性能，广泛用作防锈漆。

10.5.2 醇酸树脂涂料

醇酸树脂涂料是目前涂料生产量最大的一种合成树脂涂料，不仅本身可制成多种性能优越的品种，并且与其他类型树脂的混溶性很强，从而提高和改进了各种类型树脂漆的物理化学性能，因此醇酸树脂涂料应用极广。

醇酸树脂涂料的主要成膜物质是醇酸树脂。把干性油改性醇酸树脂，溶于有机溶剂并加入适量的催干剂就制成醇酸清漆，如在漆基中加入各种不同颜料就可以制成各色醇酸磁漆。醇酸树脂涂料的溶剂通常采用松香水、松节油和二甲苯。催干剂多采用环烷酸的金属皂。

醇酸树脂涂料具有较好的光泽和较高的机械强度，能常温干燥，它的涂膜户外耐久性很好、保光性强、平整、坚硬，和金属表面有很好的附着力，因此广泛用于金属、木材表面的涂饰，是使用最为普遍的涂料。

10.5.3 氨基树脂涂料

以脲甲醛树脂、三聚氰胺甲醛树脂或它们的混合物为主要成膜物质制成的涂料统称为氨基树脂涂料，或称氨基树脂漆。氨基树脂漆都是热固性的，必须在加热条件下，才能固化成膜，因此称为烘漆，俗称烤漆。

氨基树脂涂料，在一般情况下，总是与不干性油改性醇酸树脂混合制成，改变了单纯氨基树脂的硬度过高、质地很脆的缺点。增加了韧性，同时也提高了醇酸树脂的硬度，使不干性油得到了应用。氨基树脂与醇酸树脂的混合比例如选择适当，将能得到高光泽、高硬度和其他优异性能的涂膜。

氨基树脂除和醇酸树脂混制外，还要经过丁醇的改性方能在有机溶剂中溶解，及与其他合成树脂混溶。

以氨基树脂、醇酸树脂为主要成膜物质加入溶剂、颜料和其他填料可制成多种氨基涂料。如氨基清烘漆、各色氨基烘漆、各色半光烘漆、无光烘漆等。

氨基醇酸涂料所用溶剂为丁醇和二甲苯。氨基磁漆中所用颜料须耐热、不易变色的颜料。烘烤成膜温度一般在 100 ~ 120℃。

氨基醇酸涂料的涂膜色泽光亮，这是其他树脂所不及的，加入颜料后，颜色鲜艳丰满，保光性强、坚硬、户外耐久性优于醇酸涂料，并有优良的附着力、耐水、耐汽油、耐机油、和耐磨等性能。它主要用于要求装饰性能好的工业制品，如汽车、缝纫机、自行车、仪器仪表等金属表面。氨基清漆主要用于磁漆涂层上面的罩光。

10.5.4 防锈涂料

防锈涂料是专门用来防止金属表面锈蚀用的，均直接涂刷在金属基体上。防锈

涂料主要由防锈颜料和油性或磁性漆料组成，它之所以具有防锈功能，主要是因为加入碱性防锈颜料所致。

一般认为涂层的保护作用来自四个方面：

（1）屏障作用　涂层作为屏障，将金属与外界腐蚀介质隔离，达到保护的目的。

（2）阴极保护作用　电化学作用能使钢铁件加速腐蚀，反过来利用微电池原理，也可以防止腐蚀。例如，涂料中使用高纯度锌粉，则由于锌比铁更活泼，从而锌取代了铁作为负极（阴极），锌溶解而保护了铁。

（3）缓蚀作用　借涂料内部的化学组分与被涂金属反应，使金属表面钝化或形成保护膜，阻止腐蚀介质的腐蚀。例如，红丹（Pb_3O_4）具有高度的氧化能力，能使钢铁表面氧化生成一层密实的 Fe_3O_4 均匀薄膜，从而使钢铁表面钝化。

（4）转化作用　带锈底漆涂在钢铁件表面，可使铁锈转化为无害的物质粘附在钢铁基体上，形成一个完整的具有一定附着力的保护膜。

防锈涂料有许多品种，这里只介绍常用的红丹防锈漆、云母氧化铁防锈漆和带锈涂料。

1. 红丹防锈漆

红丹防锈漆是用红丹、油性或磁性漆料、填充料、催干剂与有机溶剂研磨调制而成的。以所用漆料不同可分磁性、油性两种（例如常见的红丹油性防锈漆和红丹酚醛防锈漆），红丹用量均不低于 60%。

红丹防锈漆是防锈漆中生产量最大、使用最悠久的品种，其防锈功能主要在于红丹。红丹的主要成分是 Pb_3O_4 及少量的 PbO，它是一种碱性颜料，很易和油中的游离脂肪酸作用生成铅皂、使漆膜更加紧密，提高了防水性能，即使渗入少量水分，它也可以将随水渗入漆膜能引起腐蚀的酸性物质中和掉。另外，它还具有高度的氧化能力。当它和钢铁表面接触时，能使钢铁表面氧化，生成一层 Fe_3O_4 的均匀薄膜，使金属表面钝化。

红丹防锈漆适用于钢铁金属表面的防锈，不适用于轻金属如铝、锌等表面（因红丹与铅、锌等起电化学作用）。红丹防锈漆在空气中易粉化，因此不宜长久在空气中暴露。红丹防锈漆所使用的溶剂主要是松香水和松节油。

2. 云母氧化铁防锈漆

新型防锈颜料云母氧化铁的主要成分是薄片状的 $\alpha-Fe_2O_3$。在涂膜中，它与钢铁表面成平行排列的紧密叠片层，从而防止水分及腐蚀性气体对钢铁的侵蚀。由于云母氧化铁化学性能十分稳定，不受水汽和酸、碱的腐蚀，其中所含少量的 FeO 又能氧化成稳定的 Fe_2O_3，因此它在涂膜中不但具有物理保护作用，还具备化学保护作用。云母氧化铁还有吸收紫外线，使其转化为红色温和状态的能力，所以云母氧化铁防锈漆耐日光老化性能也很好。由于该颜料主要成分是无毒的 Fe_2O_3，所以也就从根本上避免了铅中毒。

使用结果证明云母氧化铁酚醛防锈漆的抗水汽渗透性好，附着力强，防锈性能突出。在车辆、船舶、桥梁的施工中，无论是手工涂刷、喷涂，还是机械作业，产生的气味均小于一般的防锈漆，气体取样测定的数据表明，该漆是无毒的。另外，涂料贮存稳定性好，很少沉淀。因此，它是当前代替红丹防锈漆的优良涂料之一。

3. 带锈涂料

带锈涂料又称带锈底漆。它可用在残留锈蚀的钢铁表面，部分或全部地省去涂料施工前的除锈工作。从而可以大大缩短施工周期，改善劳动条件，降低施工费用。

带锈涂料目前大致可分为三种类型，即转化型、稳定型及渗透型。由于渗透型带锈涂料，只适于均匀而紧密的锈层，并且这类涂料中常采用红丹，而红丹为四氧化三铅，涂刷及使用中易造成铅污染及接触者的中毒，且使用效果并不十分理想。在此主要介绍应用较多的转化型带锈涂料。

转化型带锈涂料，也叫反应型带锈涂料，其原理是利用各种能与铁锈起化学反应的物质，并将铁锈转化成无害的或具有一定保护作用的络合物与螯合物。这种能与铁锈起化学反应的物质，称为转化剂。在转化剂中加入一定的溶剂就配制成转化型涂料。

转化型带锈涂料中的转化剂，主要是一些无机酸、有机酸或有机络合物等。例如磷酸、亚铁氰化钾、亚铁氰化钠、草酸、铬酸、酒石酸、丹宁酸、水杨酸、没食子酸、乙酰基丙酮等。

除转化剂外，另一组成部分为成膜物，一般均采用耐酸性能较好的树脂。例如环氧树脂、聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸乙酯、聚乙烯醇缩丁醛、过氯乙烯、氯化橡胶等。

转化型带锈涂料中，也常常加入一些填充料，常用的填料有瓷粉、辉绿岩粉、铝粉、锌粉、铅粉、氧化铁红、磷酸铝、硅酸铝、三氧化二铬及氧化钛等。

由于钢铁表面在空气中易受氧气、水分和其他化学介质的作用而生锈。其主要成分有氧化亚铁 FeO，氢氧化亚铁 $Fe(OH)_2$，氢氧化铁 $Fe(OH)_3$，含有结晶水的三氧化二铁 $Fe_2O_3 \cdot H_2O$，三氧化二铁 Fe_2O_3 及四氧化三铁 Fe_3O_4，复杂锈层中比较稳定的是 Fe_2O_3 及 Fe_3O_4，其他铁的化合物均是不稳定的化合物。

利用转化剂转化锈蚀，就是把锈蚀中不稳定的铁化合物变成稳定的铁化合物。以亚铁氰酸为基的转化型带锈涂料为例，其转化锈蚀主要是在酸性介质中亚铁氰酸与不稳定的铁化合物形成一种比较稳定的铁铬化合物－铁蓝（华蓝、普鲁士蓝）。

转化剂与铁锈反应主要生成铁蓝与磷酸铁。铁蓝是具有高遮盖力的颜料，磷酸铁是比较稳定的化合物，可在钢铁表面形成耐腐蚀的钝化膜。过量的磷酸则与铁反应，放出氢气。所以在涂刷锈层较薄的构件时，配方中转化剂的量就要减少，以免磷酸过多与铁反应放出氢气造成漆膜起泡。

转化型带锈涂料适用于锈蚀比较均匀并不残留氧化皮及片状厚锈的钢铁表面，

主要用来防锈。它形成的漆膜很薄，不能真正代替底漆使用，必须及时涂上防锈漆和面漆方能起到良好的保护作用。

10.5.5　水溶性涂料

水溶性涂料的发展极为迅速，它不仅打破了过去涂料必须使用有机溶剂的惯例，而且使涂料施工走向机械化、自动化。

目前涂料中的许多品种，都要使用不同品种、不同数量的有机溶剂。溶剂在涂料中的作用，仅仅是将主要成膜物质溶解为稀薄的溶液，便于施工。随后就要求溶剂以一定的速度挥发掉，不在涂膜中残留。所使用的溶剂如甲苯、二甲苯、乙醇、丁醇等都是重要的有机合成原料，使它们白白挥发掉，不但是经济上的浪费，而且这些溶剂，大多对人和环境有不同程度的危害。另外这些溶剂多为易燃、易爆品，如在涂料中使用不当，还会影响涂料质量，或发生事故，因此水溶性涂料具有很大的发展前途。

1. 水溶性涂料的构成机理

制备涂料所使用的主要成膜物质都是不溶于水的高分子化合物。所以制备水溶性涂料，第一步就是要使主要成膜物质成为能溶于水的水溶性树脂，然后再通过一些方法使它们构成不溶于水而且抗水的涂膜。

为了使树脂很好地溶于水，必须引入亲水性官能团，如羟基、羧基、胺基、磺酸基、酰胺基、醚氧基等。目前国内生产的水溶性树脂多选用羧基，但仅含有这些亲水性官能团，仍不能使树脂完全溶于水，只能与水混合形成乳浊液。只有将羧基转化成羧酸钠或胺（氨）皂才能溶于水。

在其成膜过程中，通过加热或加入固化剂（交联剂）使之生成不溶于水的成膜物质，以构成具有抗水性的涂膜。

总之，水溶性树脂是一种利用胺（或氨）中和后形成的高分子羧酸胺（或氨）盐。在合成水溶性树脂过程中，适当控制树脂相对分子质量的大小是很重要的。合成树脂相对分子质量小时，其水溶性好，但涂膜性能较差。相对分子质量大，物理性能好，但水溶性较差，因此为了有较好的性能，要求树脂分子大一些。为促使其水溶性好，可加入少量助溶剂（要求助溶剂既能溶于树脂又能溶于水），常用的有乙酸、丁醇、丁酮等。

2. 水溶性涂料的品种、性能及用途

水溶性涂料主要由水溶性树脂、颜料、助溶剂和水等组成，根据所用树脂不同可分为水溶性酚醛漆类、水溶性醇酸漆类、水溶性环氧漆类、水溶性聚酯漆类等。

水溶性涂料可采用电泳施工，所得涂膜不但附着力好，涂膜厚度均匀，而且缝隙及棱角都能得到均匀厚度涂膜，提高了防锈能力。水溶性涂膜的性能一般均超过同类溶剂型品种，水溶性涂料的技术指标见表 10-8。

表 10-8 水溶性涂料的技术指标

指标项目名称	技术标准
漆膜颜色与外观	平整光滑，在色差范围内
细度（刮板细度计，μm）	≤30
固体含量（%）	（50 ±2）
原漆 pH 值（25 型酸度计）	7.5 ~ 8.5
干燥时间（160℃）/h	≤1
柔韧性/mm	1
附着力（划圈法，级）	≤2
冲击强度/（N · cm）	490
耐盐水性（浸入 29℃ 氯化钠溶液中 24h）	无变化
漆膜厚度/μm	≥18

目前，水溶性涂料还存在一起问题尚待解决，例如水溶性涂料，一般都需要烘烤成膜，花色品种也不够齐全，采用电泳法涂漆时，漆液对底材表面处理要求较高。对由不同材质构成的组合件，因电沉积对底材的选择性不同，而造成漆膜不均匀等。

水溶性漆是很有发展前途的涂料品种，应用范围越来越广。目前大多数工业部门都已采用电泳法以水溶性漆来涂装底漆，在轻工业产品方面，如自行车、仪表、五金配件等也得到广泛应用。

10.5.6 其他品种涂料

1. 硝基漆

硝基漆又称硝基纤维素漆、喷漆，是以硝化棉为主要成膜物质的涂料。硝基漆属于挥发型漆。由于它干燥快、光泽好、坚硬耐磨、便于抛光修饰，调整组分比例可以制出各种规格品种，适应金属、木材、皮革等的涂饰。

硝基漆的优点：干燥快，在 10 ~ 30min 内干结成膜，所生成的漆膜，装饰性能好，颜色鲜艳。经抛光后可获得较高的光泽，而且硬度高、耐磨性、耐水性、耐化学药品等性能都比较好。

硝基漆的缺点：固体含量低，漆膜很薄，一般要喷涂多遍，施工繁琐，施工中耗用大量溶剂，既不经济又污染环境。另外，硝基漆某些性能有待提高，如耐寒性不太好。

硝基漆主要用于金属和木材表面涂装，如高级家具、仪表、缝纫机台板、收音机壳、各种乐器、工艺品等。

2. 过氯乙烯涂料

这类涂料是以过氯乙烯树脂为主要成膜物质。

过氯乙烯树脂是聚氯乙烯再经氯化反应而得的。由于过氯乙烯树脂含氯量比聚氯乙烯多，所以它的溶解性能高，易溶解于酮类、苯类和酯类溶剂，适宜制造涂料。

过氯乙烯漆和硝基漆都是属于挥发型的涂料，它适用于各种车辆、机械设备和仪表等涂装，在许多方面可以代替硝基漆，比硝基漆节约粮食和棉花，是有前途的产品。

过氯乙烯漆不能与含有 200 号溶剂汽油、醇类的涂料混合，也不能与硝基漆并用，否则会析出过氯乙烯树脂而变质。过氯乙烯漆的性能如下。

优点：干燥迅速，施工方便。具有耐候、耐水、耐油、防霉性，耐化学性能突出，能耐 25% 的硫酸、硝酸、40% 的氢氧化钠。它延燃性不好，可配制防火漆，防止火焰迅速蔓延。它的漆膜力学性能好，能在 –30℃低温下使用。

缺点：固体含量低，需要施工多层，才能达到一定厚度的涂膜。附着力较差，如施工不当，往往会整件涂膜揭起。它的耐热性能较差，仅适于 60℃以下温度使用。溶剂释放性差，表干快，实干慢。

过氯乙烯品种主要有：过氯乙烯清漆、各色过氯乙烯磁漆、各色过氯乙烯防腐蚀漆、锌黄、铁红过氯乙烯底漆等品种。

3. 丙烯酸树脂漆

丙烯酸树脂漆是由丙烯酸酯与甲基丙烯酸酯的共聚物制成的涂料。由于它具有优良的性能，因此发展迅速，成为一种新型的极有前途的涂料。

根据制造树脂时所选用的单体不同，丙烯酸漆可分为热塑性和热固性两大类。

（1）热塑性丙烯酸漆　是以热塑性丙烯酸树脂为主要成膜物质加入增塑剂制成的。也可以加入一些其他树脂，如硝化棉、三聚氰胺甲醛树脂等，以改进涂膜性能。这是一类挥发型涂料，涂料的固体含量一般在 15% ~20% 左右。它的涂膜干燥迅速，常温下 1h 即可干燥。

（2）热固性丙烯酸漆　是以热固性丙烯酸树脂为主要成膜物质的烘干型涂料。热固性丙烯酸树脂的分子结构上带有活性官能团，在加热情况下，会发生交联反应。从而变为体型结构的高聚物。该涂料由于固体含量高（40% ~50%），因此涂膜更加厚实坚韧。

丙烯酸漆的性能十分优良，其特点是：涂料本身色泽浅，可制成水白色的清漆及纯白色的磁漆；有良好的保色、保光性能；耐候性强，在大气中长期暴露漆膜稳定；耐热性、耐酸碱性及耐化学药品性能好；还有突出的三防性能（防霉、防盐雾、防湿热）等。其涂层可以常温干燥或烘烤干燥。热固性丙烯酸漆比热塑性丙烯酸漆的性能更加优越，其装饰性更好。

该类漆的缺点是：热塑性丙烯酸漆固体含量低，需多次喷涂，耐溶剂性也较差。热固性丙烯酸漆如施工不当，高温固化后容易发生漆膜脆裂。

丙烯酸漆多用于汽车、机械、航空、医疗器械、高级家具、乐器、仪器仪表、缝纫机等金属和非金属表面的涂饰，其装饰性与保护性能都很突出。

4. 聚氨酯漆

聚氨酯漆是聚氨基甲酸酯漆的简称。

聚氨酯树脂涂料根据成膜物质聚氨酯的化学组成及固化机理的不同，大致可分为五种，有单组分和多组分两种。

（1）聚氨酯改性油涂料（单组分） 它是用聚氨酯改性油制得的涂料，具有比醇酸树脂涂料优越的耐碱、耐油和耐溶剂性，主要用于涂饰木材制品。但流平性差，易于泛黄，色漆易粉化。

（2）湿固化型聚氨酯涂料（单组分） 它是用异氰酸酯类与含有羟基的聚酯、聚醚树脂或其他化合物反应而成的一种涂料。变化它们的组成和比例，可得到涂膜硬度、弹性不同的品种。该涂料的最大特点是可以在湿度较大的环境下施工固化，因此称为湿固化。它是优良的自干性涂料。这种类型的涂料有很好的耐化学腐蚀性和很突出的耐磨性，涂膜光泽，弹性很好。可以作为金属、木材、水泥等表面的防腐蚀涂料。它的清漆特别适宜作为木材地板用的涂料。

（3）封闭型聚氨酯涂料（单组分） 它是一种将异氰酸酯类与苯酚或其他化合物的预聚物与多羟基高分子化合物配制而成的涂料。施工时须经过加热烘烤，在高温下固化成膜，涂膜的性能较好。

（4）羟基固化型聚氨酯涂料（多组分） 这类聚氨酯涂料一般为双组分，一个组分是用异氰酸酯类与多元醇制成的预聚物；一个组分为含羟基的高分子化合物，如聚酯、聚醚树脂或醇酸树脂等。两种组分分装，在使用时混合。这是目前聚氨酯涂料中品种类型最多和使用最广的一类。变化预聚物和多羟基高分子化合物的品种和比例，可以制出涂膜从柔韧到坚硬的各种类型涂料，因而能适应织物、橡胶、皮革、木材、水泥、金属等物件表面的广泛施工需要。它们突出的特点是耐摩擦、附着力好，耐腐蚀性和耐久性也好，但涂膜易变黄。它的主要品种类型是底漆和磁漆，施工时配套使用。清漆可作为浸渍用的绝缘漆，国外有用这种聚氨酯涂料做客车外皮涂料的。这主要是考虑到减少涂料施工工序（不用或尽量少用腻子），延长修理间隔时间（即涂料要耐用，要求能适应强碱、强酸洗涤）。我国油罐车内壁涂的是各色聚氨酯底漆和奶白聚氨酯磁漆。

（5）催化型聚氨酯涂料（多组分） 它一般为双组分，一个组分是多异氰酸酯的蓖麻油或蓖麻油双酯的预聚物，含有游离异氰酸；另一组分为催化剂，常用的有二甲基乙醇胺、二月桂酸二丁基锡、环烷酸钴等。这种涂料使用时将两组分混合，在催化剂作用下，预聚物的游离异氰酸与空气中水分反应而固化成膜。这一类涂料具有很好的附着力、耐磨性、耐水性和光泽等，适用于木材、混凝土表面，如用作木制地板漆等。

总的来说，聚氨酯涂料具有较为全面的综合性能，其主要优点是：对金属和大多数非金属都有良好的附着力；它的漆膜富有弹性，外观平整丰满；有较高的光泽。此外，漆膜还具有耐水、耐候、耐介质、耐油、耐溶剂等性能。漆膜的耐温度交变性尤为优异，可在 $-50\sim120$℃的条件下使用。

聚氨酯漆的缺点是：聚氨酯漆中的异氰酸酯对人体有刺激作用，并有一定的毒

性，使用时应加强劳动保护；异氰酸酯对水分和潮气较为敏感，遇水易凝胶；漆膜如损坏，修复较为困难等。

10.6　特种涂料

涂料，除了上述传统的将被涂物件与空气、水分、日光以及外界的腐蚀性物质隔开，以延长使用寿命的功能外。另有一些特殊的涂料，它们不光有保护与装饰作用，还有与众不同的独特功能。例如，能防止物体表面温度的骤然上升，保证仪器设备的正常运行；能使物体保持润滑状态，从而使维护保养大为简化，能为军事装备披上伪装，使敌人难以发现……，本节介绍几种特种涂料。

10.6.1　烧蚀隔热涂料

宇宙飞船在重返大气层时，其表面会产生很高的摩擦热。为此，人们除了在飞船上使用耐高温的合金和良好的隔热材料外，还可以在飞船表面涂上烧蚀隔热涂料。在飞船与大气摩擦产生高热时，涂在飞船表面的隔热涂层就会发生熔化、蒸发、汽化等热效应，带走大量的热，起到吸热、散热和隔热的作用，从而达到保护飞船的目的。这种烧蚀隔热涂料在宇宙空间能经受来自太阳的带电粒子的轰击、高强度紫外线辐射、小流星的撞击，在极低温度下，它们具有良好的韧性。

烧蚀隔热涂料还可用来保护导弹或火箭发射场的地面装置，每次发射之后，用过的涂层很容易除去，再发射时，只要重新涂上新的就可以了。

10.6.2　耐辐射涂料

现在，X 射线和 γ 射线已广泛地应用在医学和工业等方面。这些射线照射到人体上，会影响健康，因此人们采取了各种防护措施，如建立专门的 X 射线或 γ 射线操作室，以防止这些射线伤害其他人员。操作室的地板、顶棚和墙壁即使采取了一定的保护措施，有一部分射线仍会反射回来，使操作人员的健康受到影响。涂上含有铅、铁和钙的耐辐射涂料后，这些射线就会被铅、铁、钙吸收，从墙上反射回来的射线就大大地减少了，从而能保证操作人员的健康。这种涂料即使被污染，也很容易用去污剂清洗干净。

耐辐射涂料可用在反应堆的墙壁、地板、核燃料的贮槽、实验室、更衣室、操作室等地方。它还能耐各种腐蚀性气体或液体（如氯、氟、硝酸、硫酸、氢氟酸等）的腐蚀，并且有足够的耐热性、电气绝缘性等，涂膜也不会出现起泡、剥落、龟裂等现象。

10.6.3　示温涂料

示温涂料是一种以颜色变化来指示物体表面温度及温度分布的一种涂料，在不

适宜用水银温度计、热电偶、辐射高温计等测温的地方，或者在测量机器连续运转部分以及大面积表面温度分布时，都可采用示温涂料。

示温涂料是将热敏颜料分散在粘合剂中配制而成的，由于热敏颜料在一定的温度下会发生物理或化学变化，迅速、明显地改变原来的颜色。按照涂膜变色的情况，就可以测出物体的温度。示温涂料大致可分为两种类型：一种叫做可逆性示温涂料，当温度升高到一定数值时，它的涂膜颜色会变成另一种颜色，当温度降低后，又会恢复到原来的颜色；另一种叫做不可逆性示温涂料，它的涂膜遇热达到一定温度变色后，即使温度降低，涂膜颜色也不会复原。

示温涂料在国防、工农业生产上都有一定的使用价值，例如涂在炮身、火箭、导弹上，可用来显示它们发射时某些部位的温度；涂在飞机、轮胎的运转部件上，可作过热警告指示剂，确保机件运转安全；涂于电动机表面，可作安全界限的标志，这样就可以避免超负荷而引起的火灾。此外，这种涂料还可以用来检测电信器材、仪器、化工设备的表面温度等。

10.6.4 导电涂料

导电涂料是借助导电材料（如金、银、铜、铝、石墨、炭黑等）的颗粒互相接触而传导电流的一种涂料，可用来代替一些金属导线，并可根据需要做成任意形状的电路。

目前，电子工业上应用导电涂料的场合越来越多，如在电视机显像管玻璃壳上涂石墨导电层，用作屏蔽；在玻璃纤维盘上涂导电涂料，制成轻质雷达反射器，利用涂层的导电能力，还可将电能转变成热能，用来取暖。如果采用透明的导电涂料，制成镶嵌导电膜的复合玻璃，只要将玻璃通电加热，就可以防止其表面结雾、结冰，保持良好的透明度，这种复合玻璃可用作车、船的窗玻璃及飞机的风挡玻璃。

10.6.5 发光涂料

发光涂料涂在物体表面后，经光线照射或在光照之后，能够发出光彩，光耀夺目。除能加强装饰性的新奇效果之外，还能在暗处发光，起到标志作用。因此可用在包装装潢、广告牌、路牌、饰物等方面。按不同配方，发光涂料可分为反光涂料、夜光涂料和荧光涂料三种。

（1）反光涂料　是利用玻璃微珠调在透明的有色清漆中，涂刷在反光强的铝粉底层涂料上。涂后从一定角度看，可见闪烁发光。实际上是玻璃微珠将照射来的光线反射出去，光源消失后，或角度不对时，即不能反出光来。

（2）夜光涂料　又称磷光涂料，蓄光性夜光涂料，它以硫化锌等荧光体为主要原料，是用磷光颜料加无色而透明度极高的持久稳定的成膜物质制成。经短波光线照射后，利用荧光体的蓄光性，能在暗中发光。不同的磷光颜料发出不同的色光，另一种叫做自发性夜光涂料，在荧光体的蓄光消失后，利用放射性物质放出射

线的刺激，使涂料继续发光。这种放射性物质放出的射线剂量较小，不会影响人体健康。这种涂料特别适用于夜间路标及交通道安全指示器上，也可用于钟表及飞机、船舶的仪表上。无机磷光涂料在涂刷后可维持数月发光。

（3）荧光涂料　用荧光颜料制成。在短波长光线照射后，能够发光。与磷光涂料不同之处是光源消失后，发光也立即停止，不能持续发光。常用的有机荧光颜料有夹氧杂蒽类化合物和萘二甲酰亚胺类化合物。它们能把看不见的紫外线吸收转化为可见光线，从而使色光大大增强，显得光耀夺目，色彩鲜艳。

10.6.6　伪装涂料

伪装在军事上具有重要的意义，人们常常用树枝、伪装网、涂料等，使各种军事目标与环境颜色相近，给敌人造成假象。

当敌人使用配有专门紫外光滤光器的照相机进行摄影时，用普通涂料伪装的军事目标就会在底片上暴露出来。采用含有碳酸钙或硫酸钡为填料的伪装涂料，就具有极为优良的反紫外光侦察性能。这种涂料直接刷涂或喷涂在需要伪装的目标上，就能增加目标反射紫外线的能力，使它与周围环境相似。

还有一种能吸收雷达波的防雷达伪装涂料，当飞机、舰船等目标涂上这种涂料后，雷达就很难发现它们。防雷达伪装涂料的填料是氧化铁、氧化镁，它们能吸收雷达波。

10.6.7　润滑涂料

润滑涂料是一种具有润滑作用的涂料，它不同于通常的液体润滑油，而是依靠涂料干燥后形成的固体膜来润滑的。润滑涂料中采用的固体润滑剂种类很多，有二硫化钼、石墨、一氧化铅、钼酸钠、三氟化铈、聚四氟乙烯等，掺了这些固体润滑剂，能大大地降低摩擦因数。

润滑涂料的用途很广，导弹、火箭的发射器，各种火炮和小型自动武器均可使用。润滑涂料不仅能起到润滑作用，而且还能防止风沙的污染和潮气、雨水、盐雾的腐蚀。在润滑涂层沾上灰尘之后，只要简单地擦拭就行，这就使平时的保养大大地简化。

另外，润滑涂料还适宜在极低或极高温度范围内使用，它不会因蒸发、氧化、散失而失去润滑作用。

10.6.8　陶瓷涂料

陶瓷涂料是用陶瓷材料与非金属的无机材料配制成的一种涂料。这种涂料涂在金属上形成一层陶瓷涂层后，可大大提高金属的耐火、耐氧化、耐腐蚀、耐摩擦等性能。它们在喷气发动机的燃烧室、尾喷管、火箭喷嘴、喷管的扩散段，以及熔矿炉风口、热处理炉等方面也大有用武之地。但不宜用在薄金属板或曲度大的塑料上。

10.6.9 防火涂料

防火涂料有良好的散热作用，能降低燃烧温度及火焰蔓延速度。它本身不会燃烧，遇到高温时，涂层还会起泡，形成泡沫绝缘层，使物件与火源隔开。

防火涂料一般可用在船舶、飞机、车辆、房屋、工厂及仓库等容易引起火灾的地方。它的施工方法与普通涂料一样，只是它的涂层要比普通涂料厚。

10.6.10 灭虫涂料

灭虫涂料是一种加有对害虫有致命效力药物的清漆，药物能不断地从漆膜中渗出，来杀死蟑螂、臭虫、蚂蚁、白蚁等害虫。一般可使用在船舱、仓库、图书馆、厨房、餐厅、医院等处，也可用于木材、电缆的防蚁。从漆膜中渗出的药物对人体的危害较小。

10.6.11 金属罐用涂料

镀锡板、镀铬板和铝合金薄板等金属材制成罐后，极易受内容物腐蚀，且还会引起内容物变质。因此，食品金属罐内表面均要求涂内涂料，罐头品种不同，对涂料的要求也不同。如含蛋白质丰富的水产、家禽和肉类罐头应采用抗硫涂料，以防止蛋白质受热分解而造成硫化腐蚀；酸性较强的番茄酱等要采用抗酸涂料，以防止罐壁酸腐蚀；某些含有花青素的水果，如草莓、樱桃等采用涂料后，可防止花青素腐蚀及内容物被锡还原而褪色。此外，为防止午餐肉罐头粘罐，罐头内壁需涂防粘剂；罐装啤酒罐内壁涂涂料后，可防止金属离子溶出而影响啤酒的风味和透明度。

对罐头内壁涂料的要求：

1）涂料成膜后应无毒，不影响内容物风味和色泽。

2）涂料成膜后能有效地防止内容物对罐壁的腐蚀。

3）涂膜对罐壁的附着力良好，能适应制罐工艺要求及灌装后消毒等工序的要求。

4）施涂方便，操作简单，涂膜性能良好。

5）涂料及所用溶剂价格便宜。

6）涂料贮存稳定性好。

在罐头外壁也应涂上涂料，其目的有：①以印铁商标代替纸商标，光亮美观，省去贴标工序。②防止罐外表面生锈。③适应罐头在冰箱中贮存。④可以使用罐外表面镀锡量较低的镀锡板。

对罐头外壁涂料及油墨的要求：

1）印铁商标经沸水及蒸汽加热后，涂膜不应变色、软化、脱落，且干燥性良好，不回粘。

2）涂料及油墨烘干后，不应变色。

3）涂料成膜后，附着力良好，适应制罐工艺要求。

4）涂料及所用溶剂价格便宜，适于机械化施工。

5）贮存稳定性良好。

10.6.12　塑料用涂料

（1）防静电涂料　塑料是电的不良导体，且大多数塑料吸水性差。塑料袋在加工及包装作业中常因摩擦使塑料表面带有电荷，如不清除，在包装作业中会造成开口困难，而且在包装干燥粉状食品（如奶粉等）时会造成带口部静电吸附粉状颗粒造成封口不严而泄漏。采用外涂防静电涂料则是消除塑料静电的有效方法之一。其原理是外涂的防静电涂料能够吸附空气中的水分子在涂层表面形成极薄的水膜以利导电。可制防静电涂料的物质多为有机活化剂或高极性物质。

（2）防雾滴涂料　当使用塑料包装蔬菜、水果或熟食等含水较多的食品时，当容器内部的水蒸气分压高于该温度下的饱和蒸气压时，水蒸气会在塑料表面凝结，又因为塑料的表面张力比水的表面张力小，故凝结在塑料表面的水分便形成球状小水滴（即雾滴）。

对果蔬等食品来说，塑料容器内表面结雾害处很大：小雾滴会对果蔬产生抽吸现象，使果蔬中的水分不断蒸发，造成果蔬脱水枯萎。果蔬中部分水溶性有机营养成分溶解在小水滴中，造成微生物繁殖而引起果蔬腐烂。另外，由于小雾滴的存在，会使光线发生漫反射，使塑料容器内雾化发白，降低透明度，影响销售。

防雾滴涂料由甘油单脂肪酸酯、三乙醇胺的脂肪酸盐、聚氧化乙烯型活化剂等物质所制。防雾滴涂料涂布后，其中的防雾滴剂增大了塑料的表面张力，使之与水相接近，这样，当水蒸气受冷凝结时，在塑料表面形成的是连续的极薄的水膜，而不是小水滴，达到了防雾滴的目的。

（3）提高阻隔性涂料　聚烯烃塑料具有无毒、易加工、价廉等优点，因此在食品包装中应用很普遍，但它的阻隔性不太好，在一定程度上影响了它的应用。涂布适当的涂料后可以改善其阻隔性能。

能提高聚烯烃类塑料阻隔性的涂料最常用的当属偏二氯乙烯共聚物涂料。其主要优点是：

1）因为单体结构相似，所以附着力良好，从而可以减少或不需表面处理或涂底层涂料。

2）内含的氯可以提高聚合物的极性，从而使它能溶解在有机溶剂中，便于涂料的制备。

3）涂料内所含的氯原子为极性原子，根据相似相溶原理，极性高聚物透过非极性气体的数量极低，故涂布后可降低非极性基材聚烯烃类塑料的透气性。

偏二氯乙烯共聚物涂料用来涂布聚烯烃类塑料除能提高塑料的密封性，降低塑料对氧气的渗透能力外，对塑料薄膜还能降低热封温度，改善热封性能。

偏二氯乙烯共聚物涂料常制成乳液形式应用，在乳液中，偏二氯乙烯的含量应在 50% 以上，此外还应含有可共聚的其他单体，如甲基丙烯酸或丙烯酸，以提高涂料对塑料的附着力，在此共聚物乳液中加入少量氨水，还可以提高它对水的相溶性。

10.6.13 纸用涂料

（1）清油 主要成膜物质为油而无树脂。主要成分为植物油，清油中应用最广的为桐油，桐油涂膜坚韧、耐水、耐光和耐酸碱。在桐油中加入适当的黄丹、二氧化锰进行熬制，可制成光油，主要用于瓦楞纸箱的防潮，桐油还可与其他干性油（如亚麻仁油、梓油等）适量配合使用。

（2）石蜡 是最早使用的纸用涂料，用于纸容器的防潮、防霉。石蜡为白色透明固体，50～80℃时即可软化。纸包装容器在涂蜡时，可将容器浸渍在融化的蜡液中20～30s，也可用热熔辊涂的方法。为提高石蜡的粘结力与附着力，在石蜡中常加入一定比例的松香或其他助剂。

（3）树脂涂料 成膜物质只有树脂。广泛用于纸、纸板等的涂覆，用以增强机械强度，提高防潮性、阻隔性及耐化学腐蚀性等。

常用树脂涂料的类型及主要成膜物质如下。

溶剂型：硝酸纤维、环化橡胶、丁苯橡胶、氯乙烯共聚体等。

乳液型：聚偏二氯乙烯等。

10.7 涂料的选择

涂料的种类和品种繁多，性能和用途各异。因此，如何针对涂饰的对象选用合适的涂料品种是关系到涂层质量的一个重要问题。正确的选用，不仅能有效地起到装饰和保护产品的作用，而且可降低成本。

涂料品种的选择一般要从下面几方面来考虑：

（1）根据被涂产品的材质选择 不同的材质，对各种涂料的适应性不同。因此要根据产品的材质选择与其适应的涂料品种。例如涂钢铁表面的底漆，可采用偏硼酸钡或红丹防锈底漆；涂装铝合金的底漆要用锌黄底漆；用于混凝土、泥灰的表面底漆要用耐潮碱性的底漆。

（2）根据产品使用环境选择 产品使用环境不同，引起涂层破坏的主要因素也不相同，因此应该针对产品使用的不同环境条件选择与其相适应的涂料。例如室内和室外、高温高湿地区和一般干寒地区、沿海地区和内陆地区用涂料应有所不同。影响涂层性质的主要环境因素有：温度变化、辐射、工业大气、盐雾和雨水、生物的侵蚀（湿热地区微生物和霉菌的腐蚀）；化学腐蚀（酸碱、农药、化肥、溶剂等）、生活用品（水、肥皂、醋和清洗处理剂）、机械作用等。

（3）根据涂装的目的要求选择 产品涂装的目的有的主要为了外观装饰，有的侧重于防护作用，有的既要求有装饰性，又要求有防护性，由于涂装目的多样性，所以必须根据涂装的目的和要求选择涂料。如桥梁主要是防止锈蚀，要选用缓蚀性和耐大气老化性好的涂料；化工设备、管道要选用耐化学腐蚀性能优良的涂料；仪器仪表，主要是为了外观装饰，同时也要有一定的保护作用，所以要选用既

具有装饰性又有一定防护性的涂料。

（4）根据涂材的配套性来选择　复合涂层应注意各层之间的附着力，不能由于不了解配套的重要性，而把质量较好的涂料随意乱用，甚至成分不一样的涂料随意混合，造成分层、析出、胶化等质量事故。

（5）根据施工设备条件、产量和经济条件等来选择　具体选用可参考表 10-9、表 10-10。

表 10-9　制品的用途与涂饰必须考虑的条件

制品名称	涂饰必须考虑的条件
照明器具、暖房器具	耐热性、退色性
冷藏库	硬度、耐磨性、雨水性、耐蚀性、耐寒性、耐黄变性
洗衣机	耐水性、耐碱性、耐蚀性、耐黄变性
缝纫机、电风扇	色彩的朝明度、硬度、附着性
金属家具	附着性、防蚀性、耐水性、耐热性、耐污染性
计算机	防蚀性、耐磨性
电视机等	透明度、耐湿性、退色性、音响效果
光学机械	防蚀性、耐磨性、耐冲击性
医疗器械	耐酒精性、耐油性、附着性
机床等	耐油性、耐蚀性
汽车、自行车	附着性、防蚀性、耐候性、耐水性
其他车辆	附着性、防蚀性、耐候性、难燃性、涂饰性

表 10-10　涂料用途的分类

被涂物		自然干燥类	加热干燥类
木材、竹材		合成树脂系涂料、纤维素涂料（喷漆）	合成树脂系涂料、纤维素涂料（喷漆）
金属材料	钢铁类	油性系涂料、合成树脂系涂料	
	铜合金类	合成树脂系涂料、纤维素涂料（喷漆）	
	轻合金类	合成树脂系涂料、纤维素涂料（喷漆）	合成树脂系涂料
	锌、锡类	合成树脂系涂料	
	金属电镀、金属喷涂料等	合成树脂系涂料	
塑料		合成树脂系涂料	
皮革		合成树脂系涂料、纤维素涂料（喷漆）	
纤维	织物染色	合成树脂系涂料	
	纸张	合成树脂系涂料	
墙壁		合成树脂系涂料	

10.8　涂料的施涂工艺

涂料的种类很多，要根据对被涂容器的不同要求，选择合适的涂料进行施涂。首先施涂底层涂料，然后再在底层涂料上施涂罩面涂料。

（1）底层涂料　即通常说的底漆，直接施涂于被涂物体的表面。作为涂层的

基础，它既能牢固地附着于被涂物表面，又能被上层涂料牢固地附着。根据用途，底漆可分成如下几种：

1）头道底漆：这是被涂物表面的第一层涂料。质地细密，对金属表面有很好的附着力，有防止金属锈蚀的能力，或者对木材等被涂表面有很好的渗透能力。

2）防锈漆：这是一种专门用来防止金属生锈的底层涂料。它与一般的头道底漆的区别，是它具有更强的防锈能力。防锈漆由防锈颜料和漆料组成，一般不加或少加体质颜料。

3）腻子：是白色或灰色的厚浆状涂料。腻子的组成以颜料（主要是体质颜料）和漆料为主，只含少量的成膜物质。一般不要求腻子有过高的细度，将其涂到头道底漆上，用来填平被涂物表面的洞眼及纹路等不平的地方。

4）二道底漆：腻子表面比较粗糙，二道底漆是用来填平腻子的针孔的。

5）封闭漆：对于装饰性要求比较高的被涂物，在涂饰罩面涂料之前还涂饰一层封闭漆，填平底层涂料所有不平痕迹，以得到更平整的底涂层。封闭漆用的颜料色泽要与罩面漆相适应。

（2）罩面涂料　底层涂料的作用是使涂膜附着牢固并起保护作用，罩面涂料则着重于装饰和保护作用。这两种涂料配套使用，可形成具有附着力强、保护性好、装饰性好的涂层。

罩面涂料分为罩面清漆和罩面色漆。罩面色漆要有较强的遮盖力，能遮盖被涂物本身的颜色，由遮盖力较强的颜料和漆料制得。

（3）施涂方法

1）涂漆前的表面处理：金属表面的各种腐蚀产物及沾染的杂质都会破坏漆膜的附着力，会造成漆膜脱落或继续腐蚀，因此在施涂之前要进行表面处理。不同材质及不同的表面情况，所用处理方法也不同。金属表面的处理方法很多，例如，用有机溶剂清洗、洗油清洗、碱液清洗、高温热处理除污、打磨、喷砂等机械方法处理等。

2）涂饰：一般施涂程序为底漆或防锈漆—腻子—底漆、封闭漆—罩面漆。

所选择的底漆和面漆的性能要互相适应。例如对于要求耐化学腐蚀的被涂物，所选用的底漆和面漆必须都能耐腐蚀。只有底漆和面漆配套适宜，才能延长涂膜寿命。

施涂的方法很多，如刷涂、搓涂、刮涂、喷涂、浸涂、淋涂等。大规模生产，可以采用静电喷涂方法，粉末涂料可用流态床施涂，电泳涂漆方法用于水溶性涂料等。

第 11 章　无机胶凝材料

将散粒材料（如砂、石子等）或块状材料（如砖、石块等）粘结成整体的材料，在建筑上统称为胶凝材料。

按化学成分的不同，胶凝材料分为无机和有机两大类。无机胶凝材料有石灰、石膏、水泥等；有机胶凝材料有沥青、树脂等。

按硬化条件的不同，无机胶凝材料可分气硬性和水硬性两类。气硬性胶凝材料只能在空气中硬化，也只能在空气中保持或继续提高其强度，如石灰、石膏、水玻璃等。水硬性胶凝材料不仅能在空气中，而且能更好地在水中硬化，保持并继续提高其强度，如各种水泥。

11.1　石膏

11.1.1　石膏原料与石膏的生产

石膏是一种气硬性胶结材料。生产石膏的原料主要是天然二水石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$），也称“生石膏”，也可采用化工石膏。

石膏的主要生产工序是将二水石膏加热煅烧、脱水和磨细。根据不同的煅烧条件，可生产出不同性质的产品。

当温度升高到 107 ~ 170℃时，二水石膏脱水转变为 β 型半水石膏，将 β 型半水石膏磨细即为建筑石膏。

当温度升高到 170 ~ 200℃时，半水石膏继续脱水，成为可溶性硬石膏，也叫无水石膏。半水和无水石膏经磨细而成的粉末，称为熟石膏，简称石膏。

当温度高于 400℃时，石膏完全失去水分，成为不溶性硬石膏，单独不能凝结硬化。当温度高于 800℃时，部分石膏分解出 CaO，成为高温煅烧石膏。

建筑石膏遇水时，重新水化成二水石膏。由于二水石膏比建筑石膏溶解度低，水化的二水石膏不断析出，使建筑石膏继续水化。随着水分的消耗和蒸发，浆体逐步变稠失去塑性，并逐步凝结，最后硬化成为具有一定强度的人造石。

11.1.2　建筑石膏的分类及技术指标

建筑石膏白色，密度为 2.60 ~ 2.75，疏松容重为 800 ~ 1000kg/m^3，在建筑工程中常用的有建筑石膏、模型石膏、地板石膏、高强度石膏四种，其主要用途及技术指标见表 11-1 和表 11-2。

表 11-1　建筑用熟石膏的分类及主要用途

品名	说　明	主要用途
建筑石膏	以生石膏在 150～170℃下煅烧至完全变为半水石膏而成。这种石膏与水调和后，凝固很快，并在空气中硬化	调制石膏砂浆，建筑艺术配件及建筑装饰，彩色石膏制品、石膏墙板等建筑构件，并可作石膏粉刷
地板石膏	以生石膏在 400～500℃或高于 800℃下煅烧而成。磨细及用水调和后，凝固及硬化缓慢，7d 的抗压强度约为 10MPa，28d 约为 15MPa	1. 石膏地面 2. 石膏灰浆、抹灰及砌墙用 3. 石膏混凝土
模型石膏（塑像石膏）	以生石膏在 190℃下煅烧而成。凝结较快；调制成浆后于数分钟至 10 余分钟内即可凝固	供作模型塑像、美术雕塑、室内建筑装饰、人造石及粉刷之用
高强度石膏（硬结石膏）	以生石膏在 750～800℃下煅烧，并与硫酸钾或硫酸铝（明矾）共同磨细而成。这种石膏凝固很慢，但硬化后抗压强度达 25～30MPa，色白能磨光，质地坚硬且不透水	供制人造大理石，石膏板，石膏砖，人造石及粉刷用（石膏砖、人造石、石膏板等可用于浴室墙壁及地面等处）

表 11-2　建筑用熟石膏的技术指标

技术指标		建筑石膏			模型石膏	高硬石膏
项目	指标	优等	一等	二等		
凝结时间/min	初凝，不早于	5	4	3	4	3～5
	终凝，不早于	7	6	6	6	7
	终凝，不迟于	30	30	30	20	30
细度（筛余量%）	0.2mm 方孔筛	5.0	10.0	15.0	10	
抗折强度/MPa		2.5	2.1	1.8	1.6	2.5～5
抗压强度/MPa		5.0	4.0	3.0	10～15	25～30

根据《建筑石膏》（GB 9776—2008）标准规定，建筑石膏按抗折、抗压强度和细度分为优等品、一等品和合格品三个等级。

建筑石膏为白色粉末，密度一般为 2.60～2.75g/cm^3，堆积密度为 800～1000kg/m^3。

建筑石膏产品标记的顺序为：产品名称、抗折强度、标准号。

11.1.3　建筑石膏的硬化

建筑石膏与适当的水混合，最初成为可塑性的浆体，但很快就失去塑性，这个过程称为凝结过程，以后迅速产生强度，并发展成为坚硬的固体，这个过程就是硬化过程。

建筑石膏凝结硬化快，常温下完全水化的时间为 5～15min，终凝时间不超过 30min，7 天左右完全硬化。在施工中，如果需要加速凝固，可掺入少量磨细的未

经煅烧的石膏，需要缓慢凝固，则可掺入为水重 0.1% ~0.2% 的缓凝剂，如动物胶或硼砂等。

建筑石膏完全水化的理论需水量仅为 18.6%，但为了保证可塑性，实际加水量通常为 60% ~80%。硬化后多余水分蒸发，制品内部形成大量孔隙，因此石膏制品较轻，隔热保温性能好，但强度不高。

建筑石膏在硬化过程中，体积约膨胀 1%。这一性质使石膏制品尺寸精确，表面光滑，干燥时也不开裂。

建筑石膏硬化后的主要成分是二水石膏。遇火时，二水石膏中的结晶水脱水，制品表面水分蒸发，从而阻止火势蔓延，使温度上升缓慢，起到防火作用。制品厚度越大，防火性能越好。

11.1.4　建筑石膏的应用

建筑石膏可适用于室内抹灰和粉刷。与石灰抹灰相比，石膏抹灰更加洁白、美观。建筑石膏可制成各种石膏雕塑、饰面板及各种装饰件，还可制成微孔石膏、泡沫石膏、加气石膏等多种石膏制品。此外，石膏制品加工方便，能锯、钉、刨、钻。

建筑石膏的缺点是吸水性强，吸水后强度下降。吸水受冻时，制品易遭破坏。

11.1.5　建筑石膏的使用与保管

建筑石膏适用于室内装饰，隔热保温、吸音和防火等，但不宜在靠近 65℃ 以上的高温下使用。因为二水石膏在此温度时将开始脱水分解。

建筑石膏硬化后具有很强的吸湿性，在潮湿环境中，晶体间粘结力削弱，强度显著降低；遇水则晶体溶解而引起破坏；吸水后受冻；将因孔隙中水分结冰而崩裂。所以，建筑石膏的耐水性和抗冻性都较差，不宜在室外装饰工程中使用。

各种熟石膏都易受潮变质，但其变质速度不一样，其中建筑石膏变质速度快，所以，特别需要防止受潮和避免长期存放。一般储存三个月后，强度降低 30% 左右。

11.2　石灰

建筑工程上所用的石灰，是用含碳酸钙较多的石灰石经过 800 ~1000℃ 煅烧而成，它的主要成分是氧化钙，又称生石灰。

11.2.1　石灰的烧制

石灰岩经高温燃烧而得到的块状产品，称为“生石灰”，其主要成分是 CaO。燃烧时的反应如下：

$$CaCO_3 \xrightarrow{900\sim1000℃} CaO + CO_2$$

为了加快燃烧过程，常使温度高达 1000 ~ 1100℃。煅烧时的温度高低及分布情况，对石灰质量有很大影响。如温度偏低或分布不均匀，碳酸钙不能完全分解，则产生欠火石灰，降低石灰的利用率；若温度偏高，则产生过火石灰，影响使用。原料纯净、燃烧正常的块状石灰，质轻色匀，呈松软多孔结构。生石灰的密度约为 3.2，表观密度为 800 ~ 1000kg/m^3。

由于原料中常含有碳酸镁，故石灰中含有一定量的 MgO。MgO 含量 <5% 的生石灰，称为“钙质石灰”；MgO 含量 >5% 的生石灰，称为“镁质石灰”。

11.2.2 石灰的熟化

在使用石灰时，通常将生石灰加水，使之消解为熟石灰 – 氢氧化钙，这个过程称为石灰的“熟化”。石灰熟化反应如下：

$$CaO + H_2O = Ca(OH)_2 + 64.9kJ$$

熟化，就是将生石灰在化灰池中加水融化，通过网孔流入储灰池内。石灰在熟化过程中放出大量的热，体积膨胀约 1.5 ~ 2 倍。熟化后的石灰，称为“熟石灰或消石灰”。

石灰浆在储灰池中沉淀并除去上层水分后，称为石灰膏，石灰膏容重为1300 ~ 1400kg/m^3，1kg 生石灰可化成 1.5 ~ 3L 石灰膏。另一种熟化方法是将生石灰熟化成熟石灰粉，方法是采用分层浇水法，每层石灰厚约 500cm。熟化好的石灰粉称为消石灰粉。

消石灰粉在建筑工程中多用于拌制石灰土、三合土和砌筑砂浆。

11.2.3 石灰的硬化

石灰浆体在空气中逐渐硬化，是由两个同时进行的过程来完成的：

（1）结晶作用　石灰浆体中水分蒸发或被砌体吸收，氢氧化钙逐渐从过饱和溶液中析出，形成结晶。

（2）炭化作用　氢氧化钙与空气中的二氧化碳和水化合，生成不溶于水的碳酸钙结晶，释放出水分。

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + nH_2O = CaCO_3 + (n+1)H_2O$$

炭化作用实际是二氧化碳与水形成碳酸，然后与氢氧化钙反应生成碳酸钙的过程。由于空气中二氧化碳的浓度极低，石灰的炭化作用主要发生在与空气接触的表面。当表面炭化成致密的碳酸钙后，阻止二氧化碳继续透入内部，同时也影响内部水分蒸发，使氢氧化钙结晶速度减慢。因此，石灰浆体的硬化过程非常缓慢。石灰砂浆在较长时间内，经常处于湿润状态，不能达到一定的强度和硬度；而且纯石灰浆在硬化时收缩较大，易产生收缩裂缝，为了弥补这个缺陷，在工程上常适当加入

水硬性材料，例如，加入水泥等配成石灰砂浆使用。掺入砂子能构成骨架，减少收缩，并节约石灰；同时，还能形成孔隙，使内部水分易于蒸发，二氧化碳易于透入，可大大加快砂浆的硬化过程。

硬化后的石灰体孔隙率大、密实度小、强度低，未炭化的氢氧化钙结晶易溶于水，耐水性差。因此，石灰不宜用于潮湿环境。

为克服石灰的一些缺点，可将块状生石灰粉磨制成磨细生石灰。它使用时直接加水，其熟化和硬化过程几乎同时进行，具有硬化快、强度大、生石灰利用率高等特点。

11.2.4　石灰的技术性能

划分石灰等级的依据是：石灰的活性、产浆量及未熟化颗粒含量等项目。活性越高，质量越好。未熟化颗粒越多，质量越差。

石灰的质量标准见表 11-3，石灰的外观质量鉴别见表 11-4。

表 11-3　石灰的质量标准

指标名称		块灰		生石灰粉		水化石灰		石灰浆	
		一等	二等	一等	二等	一等	二等	一等	二等
活性氧化钙及氧化镁之和（干重%）不小于		90	75	90	75	70	60	70	60
未烧透颗粒含量（干重%）不大于		10	12					3	12
每 kg 石灰的产浆量（不小于）/L		2.4	1.8	暂不规定					
块灰内细粒的含量（干重%）不大于		8	10	暂不规定					
标准筛上遗留量（干重%）	每平方厘米 900 孔筛上不得大于	无规定		3	5	3	5	无规定	无规定
	每平方厘米 4900 孔筛上不得大于	无规定		25	25	10	5	无规定	无规定

表 11-4　外观质量鉴别

特征	新鲜灰	过火灰	欠火灰
颜色	白色或灰黄色	色暗带灰黑色	中部颜色比边部深
重量	轻	重	重
硬度	疏松	质硬	外部疏松，中部硬
断面	均一	玻璃状	中部与边缘不同

11.2.5 石灰的用途

石灰在建筑上应用很广，常用来配制石灰砂浆、水泥石灰混合砂浆等，作为砌筑砖石和抹灰之用，能获得良好的装饰效果。用石灰膏拌制的砂浆一般都具有较好的和易性，常用于基层上的底层灰和中层灰。石灰膏与水泥、砂子、水拌成混合砂浆，也可用于基层上的底层灰及各种基层上的中层及面层灰。

石灰与粘土可配制成灰土，再加入砂子可配成三合土，经过夯实，具有一定的强度和耐水性，可用于建筑物的基础、垫层以及路基等。

石灰是生产灰砂砖、蒸养粉煤灰砖等硅酸盐建筑制品及无熟料水泥的主要原料，也是生产炭化石灰板的主要原料。

11.2.6 石灰的保管

生石灰极易吸收空气中的水分而自行水化，并与空气中的二氧化碳作用，还原为白色粉末状的碳酸钙，而失去粘结能力。生石灰在运输和贮存时应避免受潮，防止吸收水分而自行熟化，因此，生石灰运到工地后，应设法防潮防水，最好放在封闭严密的贮仓中，且存期不宜过长，以防止自然熟化和硬化。生石灰有强烈的腐蚀性，因此，不得放在木地板上。生石灰遇水发生消化反应时，能释放出大量的热，因此，不得和易燃、易爆及液体物品混存混运。生石灰不易长期存放，保管期不宜超过一个月。如需要长期保存，可将生石灰预先在石灰熟化池内熟化成熟石灰，然后用砂子铺盖，这样可长久贮存石灰而使其不变质。已熟化的石灰应在隔绝空气的条件下，在化灰池中贮存，随用随取。

11.2.7 磨细生石灰粉

将块状生石灰碾碎磨细所得的成品，称为磨细生石灰。磨细生石灰代替石灰膏浆，除可节约石灰 20% ~30% 外，还具有其他优点。

用熟石灰（石灰膏）抹灰时，由于在硬化时要排除大量水分，因而硬化非常缓慢，并在粉饰层常有湿润出水现象。采用磨细生石灰粉，由于将石灰消筋和凝固的两个分离步骤，合并在一个统一而连续的过程中，这样就大大增加了凝结硬化的速度，缩短了石灰砂浆抹灰的凝固与硬化时间，因而加快了施工进度，取消了工地的淋灰过程和设备。

磨细生石灰粉加水以后生成 $Ca(OH)_2$ 放出热量温度升高，因此在负温条件下采用生石灰粉还可以成热砂浆，适于冬期施工。

磨细生石灰粉的凝结时间与水灰比有关，现将与消石灰凝结时间比较，参考表 11-5。

表 11-5　磨细生石灰粉与消石灰凝结时间比较表

水灰比	磨细生石灰粉		消石灰	
	初凝	终凝	初凝	终凝
0.80	10min	1h 45min	6h 36min	47h 47min
1.00	14min	23h 30min	28h	—
1.25	40min	195h	42h 53min	302h 40min
1.50	41min	221h 16min	180h	578h

11.3　水玻璃

水玻璃是一种溶解于水的，由碱金属氧化物和二氧化硅结合而成的硅酸盐材料。如硅酸钠（$Na_2O \cdot nSiO_2$）、硅酸钾（$K_2O \cdot nSiO_2$）等。

建筑上通常使用的水玻璃是硅酸钠的水溶液，为无色、青绿色或棕色粘稠液体。水玻璃的制造方法是将石英砂、纯碱或硫酸钠，在玻璃熔炉内以 1300 ~ 1400℃的温度熔化，冷却后即成固态水玻璃：

$$Na_2CO_3 + nSiO_2 \xrightarrow{1300 \sim 1400℃} Na_2O \cdot nSiO_2 + CO_2 \uparrow$$

固态水玻璃在 0.3 ~ 0.8MPa 压力的蒸压锅内加热，溶解成液态水玻璃。液态水玻璃是一种胶质溶液，具有胶结能力。

水玻璃分子式中 SiO_2 与 Na_2O 分子数比称为水玻璃的模数，一般在 1.5 ~ 3.5 之间。水玻璃的模数 n 越大，其胶体组分越多，粘性越大，越难溶于水。

水玻璃在空气中二氧化碳的作用下，析出无定型二氧化硅凝胶，并逐渐干燥而硬化。

$$Na_2O \cdot nSiO_2 + CO_2 + mH_2O = Na_2CO_3 + nSiO_2 + mH_2O$$

上述硬化过程很慢，为加速硬化，可将水玻璃加热或掺适量促硬剂氟硅酸钠，以加速二氧化硅凝胶的析出和硬化。

水玻璃在建筑工程中，主要有以下几方面的用途：

1）将水玻璃溶液涂刷于混凝土、砖、石、硅酸盐制品等材料的表面，提高材料的密实度和抗风化性，但不能用水玻璃涂刷石膏制品。

2）水玻璃具有抵抗大多数无机酸（氢氟酸除外）的作用，故常用于配制耐酸砂浆和耐酸混凝土。

3）水玻璃的耐热性较好，可用于配制耐热砂浆和耐热混凝土。

4）将水玻璃配制成各种促凝剂，掺入砂浆或混凝土中，可使砂浆或混凝土急速硬化，用于堵塞漏水很有效。

5）水玻璃与氯化钠溶液交替灌入土中，可以加固土壤。

此外，水玻璃也是配制某些建筑涂料的原料。

11.4 菱苦土

菱苦土又名苛性苦土、苦土粉、苛性菱镁矿或氧化镁。它是以天然菱镁矿（碳酸镁）为原料，在800～850℃下煅烧后，磨成细粉状的一种气硬性胶结材料。色白或灰白，有的为淡黄色或棕色，新鲜面有玻璃光泽，比重在3.2左右，容重为800～900kg/m^3。

菱苦土不用水而用氯化镁溶液（卤水）拌和。用氯化镁拌和比用水拌和硬化快，强度高。比重为1.2的氯化镁溶液调制的标准稠度浆体，初凝不应早于20min，终凝不应迟于6h；在20℃温度下试验，安定性应该良好。

菱苦土可与木屑拌和，就地浇捣、夯实、铺制菱苦土板可代替木版制包装箱，并可调制镁质抹灰砂浆，在装饰工程中应用较广。

11.5 水泥

属于水硬性无机胶凝材料的水泥，是重要的建筑材料之一。它大量应用于工业与民用建筑工程，还广泛应用于农业、水利、铁路、公路、海港和国防建设等工程。

水泥呈粉末状，与水混合后经过物理化学变化过程，能由可塑性浆体变成坚硬的石状体，并能将散状材料胶结成整体，所以，水泥是一种良好的矿物胶凝材料。就硬化条件而言，水泥浆体不但能在空气中硬化，还能更好地在水中硬化，并长期地保持和继续提高其强度，故水泥属于水硬性胶凝材料。

11.5.1 水泥的技术性质

（1）密度与容重　普通水泥的密度为3.0到3.15，通常采用3.1；容重为1000～1600kg/m^3，通常采用1300kg/m^3。

（2）细度　指水泥颗粒的粗细程度。颗粒越细，水泥硬化的越快，早期强度也越高。但在干燥大气中硬化，体积会有较大的收缩。

（3）凝结时间　水泥从加水搅拌到开始凝结所需要的时间称为初凝时间，已经初凝的水泥，塑性大为降低，水泥从加水搅拌到凝结完成所需的时间称为终凝时间。水泥的凝结时间与水泥的品种和混合材料的掺量有关。硅酸盐水泥的初凝时间不早于45min，一般为1～3h，这样便有充分的时间进行搅拌、运输和操作；终凝时间不迟于12h，一般为5～8h，便于施工完毕后凝结硬化。

（4）强度　水泥强度按国家标准强度检验方法，是将龄期3天和28天的试件测得其强度值，以MPa表示。

（5）体积安定性　简称安定性，是指水泥在硬化过程中体积变化的均匀性能。

如果水泥中含有较多的游离石灰、氧化镁或三氧化硫，就会使水泥的结构产生不均匀的变形，甚至破坏。

（6）水化热　水泥与水的作用为放热反应，在水泥硬化过程中，不断放出热量称为水化热。

11.5.2　水泥的种类和标号

（1）常用的五种水泥如下

1）硅酸盐水泥。凡以适当成分的生料，烧至部分熔融，所得以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料，加入适量的石膏，磨细制成的水硬性胶凝材料，称为硅酸盐水泥。

2）普通硅酸盐水泥。凡由硅酸盐水泥熟料，少量混合材料和适量石膏磨细制成的水硬性胶结材料，称为普通硅酸盐水泥。

由于在普通水泥成分中，绝大部分仍然是硅酸盐水泥熟料，所以它的基本性质与硅酸盐水泥接近。

3）矿渣硅酸盐水泥。凡由硅酸盐水泥熟料和粒化高炉矿渣，加入适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，称为矿渣硅酸盐水泥（简称矿渣水泥）。

由于矿渣水泥中的硅酸盐水泥熟料比硅酸盐水泥少，同时还掺有大量的粒化高炉矿渣，因此，矿渣水泥在性质上与硅酸盐水泥和普通水泥有较大的差异。

4）火山灰质硅酸盐水泥。凡由硅酸盐水泥熟料和火山灰质混合材料，加入适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，称为火山灰质硅酸盐水泥（简称火山灰水泥）。

5）粉煤灰硅酸盐水泥。凡由硅酸盐水泥熟料和粉煤灰，加入适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，称为粉煤灰硅酸盐水泥（简称粉煤灰水泥）。

由于粉煤灰水泥干缩性较小，加上水化热较低，抗侵蚀性较强，因此，特别适用于大体积水工建筑物。

常用水泥的标号和各龄期的强度要求见表 11-6。常用水泥的特性及用途见表 11-7。

表 11-6　常用水泥的标号和各龄期的强度要求

品种	强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		3d	28d	3d	28d
硅酸盐水泥	42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	22.0	42.5	4.0	6.5
	52.5	23.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	27.0	52.5	5.0	7.0
	62.5	28.0	62.5	5.0	8.0
	62.5R	32.0	62.5	5.5	8.0

（续）

品种	强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		3d	28d	3d	28d
普通硅酸盐水泥	32.5	11.0	32.5	2.5	5.5
	32.5R	16.0	32.5	3.5	5.5
	42.5	16.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	21.0	42.5	4.0	6.5
	52.5	22.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	26.0	52.5	5.0	7.0
矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥	32.5	10.0	32.5	2.5	5.5
	32.5R	15.0	32.5	3.5	5.5
	42.5	15.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	19.0	42.5	4.0	6.5
	52.5	21.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	23.0	52.5	4.5	7.0

注：R—早强型。

表 11-7　常用水泥特性及用途

品种 / 特性及用途	普通硅酸盐水泥	硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥	火山灰质硅酸盐水泥	粉煤灰硅酸盐水泥
凝结速度	快	最快	较低，低温更慢	较低	较低
强度发展	较低于硅酸盐水泥	早期强度与后期强度都较高，适合于地面、面层配制砂浆	早期强度较低，在低温环境中强度增长较慢，但后期强度增长很快	同矿渣水泥	低
水化热	较高	较高	较低，适合于大体积混凝土	同矿渣水泥	比矿渣还低，和易性好
耐热性	较好		较好	差	差
干缩性	好	较好	较大	大	较小
抗冻性	好，可用于冰冻的工程	抗冻，耐磨性好	较差	差	较差
耐蚀性	差，主要用于一般工程	较差	对硫酸盐类侵蚀抵抗力和抗水性较好	同矿渣水泥	较好

（2）装饰水泥　用于装饰建筑物的表层，使用装饰水泥比使用天然石材更容

易得到所需的色彩和装饰效果。装饰水泥还有施工简单，造型方便，维修容易，价格便宜等优点。

装饰水泥有白色硅酸盐水泥和彩色硅酸盐水泥。

1）白色硅酸盐水泥：凡以适当成分的生料，烧至部分熔融所得，以硅酸钙为主要成分及含少量铁质的熟料，加入适量的石膏，磨成细粉，制成白色水硬性胶结材料，称为白色硅酸盐水泥，简称白水泥。按国家标准（GB/T 2015—2005）规定，白水泥的标号分为 32.5 和 42.5、52.5 三个标号，白度值不低于 87，其技术标准见表 11-8。

表 11-8　白色硅酸盐水泥的技术标准

项　目			技术标准			
物理性能	白度		87			
	细度		80μm 方孔筛，筛余量不得超过 10%			
	凝结时间		初凝不早于 45min，终凝不迟于 10h			
	安定性		用沸煮法试验，合格			
	强度	强度分类及龄期 / 强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
			3d	28d	3d	28d
		32.5	12.0	32.5	3.0	6.0
		42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
		52.5	22.0	52.5	4.0	7.0
化学性能	安定性	煮沸检验法必须合格				
	氧化镁	熟料氧化镁的含量不得超过 5.0%				
	三氧化硫	水泥中三氧化硫的含量不得超过 3.5%				

2）彩色碳酸盐水泥：凡以白色硅酸盐水泥熟料和优质白色石膏在粉磨过程中掺入颜料、外加剂（防水剂、保水剂、增塑剂、促凝剂等）共同粉磨而成的一种水硬性彩色胶结材料，称为彩色硅酸盐水泥，简称彩色水泥。

彩色水泥中常用的颜料有氧化铁（可制红、黄、褐、黑色），二氧化锰（黑、褐色），氧化铬（绿色），钴蓝（蓝色），群青蓝（蓝色），炭黑（黑色）及孔雀蓝（蓝色），天津绿（绿色）等。

装饰水泥性能同硅酸盐水泥相近，施工和养护方法与硅酸盐水泥相同，但极易污染，使用时注意防止其他物质污染，搅拌工具必须干净。

11.5.3　水泥品种的选用

目前世界上水泥品种已达 200 余种，我国水泥品种也达 200 余种，并日益增多。在选用水泥品种时，应根据工程性质、施工条件，同时考虑各种水泥的特性，在保证质量和节约水泥的前提下做到合理使用。对于特种水泥的选用，尤应慎重。

水泥品种的选用参见表 11-9。

表 11-9 常用水泥的选用

工程特点及所处环境	优先选用	可以使用	不得使用
一般地上土建工程	普通硅酸盐水泥，混合硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥，火山灰质硅酸盐水泥	
气候炎热地区施工的工程	普通硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥	火山灰质硅酸盐水泥，矾土水泥
严寒地区施工的工程	高标号普通硅酸盐水泥，快硬硅酸盐水泥，特快硬硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥，矾土水泥	火山灰质硅酸盐水泥
严寒地区水位升降范围内的混凝土工程	高标号普通硅酸盐水泥，快硬硅酸盐水泥，特快硬硅酸盐水泥，抗硫酸盐硅酸盐水泥	矾土水泥	火山灰质硅酸盐水泥，矿渣硅酸盐水泥
大体积混凝土工程	硅酸盐大坝水泥，矿渣硅酸盐大坝水泥	火山灰质硅酸盐水泥，矿渣硅酸盐水泥	矾土水泥
受蒸汽养护的工程	火山灰质硅酸盐水泥，矿渣硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥	矾土水泥
有耐磨性要求的混凝土工程	高标号普通硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥	火山灰质硅酸盐水泥
地下水中的混凝土工程	火山灰质硅酸盐水泥，矿渣硅酸盐水泥，抗硫酸盐硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥	
受海水及含硫酸盐类溶液侵蚀的工程	抗硫酸盐硅酸盐水泥，火山灰质硅酸盐水泥	硅酸盐大坝水泥，矿渣硅酸盐水泥，矾土水泥	硅酸盐膨胀水泥
早期强度要求较高的工程	高标号普通硅酸盐水泥，快硬硅酸盐水泥，特快硬硅酸盐水泥	高级水泥，矾土水泥	火山灰质硅酸盐水泥，矿渣硅酸盐水泥，混合硅酸盐水泥
大于 C_{50} 级的混凝土工程	高级水泥、浇筑水泥	特快硬硅酸盐水泥，高标号普通硅酸盐水泥	火山灰质硅酸盐水泥，矿渣硅酸盐水泥，混合硅酸盐水泥
耐酸防腐工程	水玻璃型耐酸水泥	快硬耐酸胶结料	耐铵聚合物胶凝材料
耐铵防腐蚀工程	耐铵聚合物胶凝材料		水玻璃型耐酸水泥
耐火混凝土工程	低磷铝酸盐耐火水泥	矾土水泥，矿渣硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥

（续）

工程特点及所处环境	优先选用	可以使用	不得使用
防水抗渗工程	硅酸盐膨胀水泥，石膏矾土膨胀水泥	自应力膨胀水泥，普通硅酸盐水泥，火山灰质硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥
防潮工程	防潮硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥	
油井堵漏工程	油井水泥		
紧急抢修和加固工程	高级水泥，浇筑水泥，快硬硅酸盐水泥，特快硬硅酸盐水泥	矾土水泥，硅酸盐膨胀水泥，石膏矾土膨胀水泥	火山灰质硅酸盐水泥，矿渣硅酸盐水泥，混合硅酸盐水泥
混凝土预制构件拼装锚固工程	浇筑水泥，高级水泥，特快硬硅酸盐水泥	硅酸盐膨胀水泥，石膏矾土膨胀水泥	普通硅酸盐水泥
自应力构件及制品	自应力膨胀水泥	普通硅酸盐水泥与矾土水泥配制	
保温、隔热工程	矿渣硅酸盐水泥，普通硅酸盐水泥	低钙铝酸盐耐火水泥	
装饰工程	白色硅酸盐水泥，彩色硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥	
特殊小机件、精密接缝工程	磷酸锌胶凝材料		

11.5.4　水泥的储运管理

水泥在储运中如与空气接触，会吸收空气中的水分和碳酸气体而发生轻微的水化、炭化反应，使之受潮后会固化成粒状或块状，使水泥烧失量增加、密度减小、凝结迟缓和强度降低。严重者会变成水泥石，而失去使用价值。水泥受潮的反应是水泥中游离石灰与空气中的水发生反应。反应中会分离出水，这样的反应加速了水泥的受潮，从而降低了水泥的胶结能力。在高温潮湿的条件下，水泥受潮将加快，因此水泥在储运管理中必须注意防潮并防止空气流动。

水泥储存期不宜过长，日久会变质结块，根据试验结果，袋装水泥在普通的储存六个月期间，每一个月降低强度可达 5% ~10%，因此，水泥从出厂至使用不宜超过三个月。长期储存的水泥，在使用前必须通过试验以确定它的品质。尤其对于快硬水泥、高级水泥、高铝水泥、硅酸盐膨胀水泥等，由于水泥颗粒较细，比硅酸盐水泥更容易吸潮变质。根据标准规定，从包装时算起，快硬水泥和特快硬水泥的储存期为一个月，高铝水泥为两个月。无熟料水泥一般一个月储存期就可能使强度基本损失而无胶凝性。对于受潮水泥的处理可参见表 11-10。

表 11-10　水泥受潮处理方法

受潮程度	适用情况	处理方法
水泥呈松块，但可以用手捏成粉末	经试验合格后，根据实际标号使用	使用时须将松块均压成粉末，应加以强搅均匀
水泥部分成硬块	经试验后，根据实际标号使用，或用于受力较小不重要部位	将硬块筛去，压碎松块后使用
水泥大部分成为硬块	不能直接使用	压成粉末后，可掺入一般水泥（最多不能超过 25%）经试验后使用

水泥在进场后，在贮存时应做到：

1）入库的水泥应按品种、标号、出厂日期分别堆放，并树立标志。做到先到先用，并防止混掺使用，避免长期积压。

2）为了防止水泥受潮，现场仓库应尽量密闭不得漏雨，并有防潮、隔热措施，地坪应铺砖、木板或席子，并高出地面 30cm 以上。堆放高度以 10 袋为宜，堆放宽度以 5 ~ 10 袋为限，每堆最好不超过 1000 袋。

3）临时露天暂存时水泥也应用防雨篷布盖严，底板要垫高并采取防潮措施，一般可用油毡或布铺垫。垛底要高出地面至少 20cm 以上。

4）散装水泥最好放置在密封良好，能保证上进下出的罐体内，如无这种设备，则应堆放在室内或砖砌的水泥池内，并要采取严格的防潮措施

5）装饰水泥的保管还应严格防止混入带色杂质，要特别注意防止和他种水泥混杂。装饰水泥比一般水泥细度高，更易风化变质，保管时更应严格防潮。

第 12 章　复 合 材 料

12.1　概述

复合材料是一种新型的工程材料，它具有一系列其他材料不能与之相比的优点，它的出现为新材料的发展开辟了一个新的领域。

在工程上，复合材料主要是指为克服单一材料的某些弱点，充分发挥材料的综合性能，将一种或几种材料用人工的方法均匀地与另一材料结合而成的一种工程材料。复合材料是由两种以上在物理和化学性质上不同的物质组合起来的。更广义地讲，是用适当的工艺方法把两种或多种性质不同的材料复合而成的新材料。复合材料通常比单一材料有更优良的性能。如碳纤维的比强度、比模量很高，但脆性较大，如果与柔软的树脂基体复合，便可获得兼有树脂与碳纤维二者所长的树脂基复合材料；多数金属较坚韧，但不耐高温，而陶瓷耐高温却又较脆，若将二者作成复合材料，这种新材料称为金属陶瓷材料。混凝土性能脆但却有较高的抗压强度，钢材性能韧而有较高的抗拉强度。为使性能上取长补短，因而制成钢筋混凝土——我们日常所见的一种复合材料。又如单层木板容易翘曲变形，将不同木纹方向的单层木板胶合在一起制成层压板则不易翘曲变形，而且力学性能大大改善。诸如此类复合材料，在工程上是屡见不鲜的。由上可知，“复合”已成为改善材料性能的一种手段。因此，复合材料越来越引起人们的重视，新型复合材料的研制和应用也越来越多。

12.2　复合材料的分类与特性

12.2.1　分类

现在常用来表示复合材料的形式是斜线上表示增强材料，斜线下表示基体材料，如碳纤维/环氧复合材料。

复合材料按以下方法分类：

（1）以基体材料分类　金属基复合材料、塑料基复合材料、树脂基复合材料、陶瓷基复合材料、橡胶基复合材料。

（2）以增强材料分类　碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料、有机纤维复合材料、复合纤维（SiC、B）复合材料等。

（3）以增强材料外形分类　纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料（如金属

陶瓷）等。叠层增强复合材料、骨架增强复合材料，如钢—铜—塑料三层复合无油润滑轴承材料等。

在以上三类材料中，以纤维增强复合材料发展较快，应用最广。

12.2.2 特性

复合材料的主要优点是能根据人们的要求来改善材料的使用性能，使各种组成材料取长补短并保持各自的最佳特性，从而有效地利用材料。例如由树脂和玻璃纤维组成的复合材料——玻璃纤维增强复合材料（俗称玻璃钢），既提高了树脂的强度和刚度，又改善了玻璃纤维的脆性。应该指出，材料经过复合之后，有的性能指标往往超过了各组成材料性能的总和。例如玻璃纤维的断裂能只有 75×10^{-5}J，常用树脂的断裂能在 22.6×10^{-3}J 左右，而玻璃纤维增强复合材料的断裂能可达 17.6J 之多。由此可知，“复合”已成为改善材料性能的一种手段。因此，复合材料越来越引起人们的重视，新型复合材料的研制和应用也越来越多。总之，复合材料是一种新型的、很有发展前途的工程材料。

12.3 复合理论

复合材料的复合不是组成材料的简单组合，而是一种包括物理的、化学的、力学的甚至生物学的相互作用的复杂结合过程，其增强的实质和某些规律，简单概述如下：

（1）粒子增强复合理论　粒子增强复合是将增强粒子高度弥散分布在基体中，使基体主要承受载荷，而增强粒子阻碍导致基体塑性变形的位错运动（金属基体）或分子链运动（高聚物基体）。其强化效果与所含粒子体积、粒子特性、粒子间距离及粒子直径大小有关。一般认为，粒子越小，强化效果越大。但粒子直径过小（$\leqslant 0.01\mu m$），则近于固溶体结构，不起粒子增强作用；若粒子直径过大（$>0.1\mu m$），容易引起应力集中可能成为裂纹源，反而使强度降低。实践表明，粒子直径在 0.01～0.1μm 范围内强化效果最好。金属陶瓷、金属细粒与塑料、碳与橡胶、烧结铝等的复合强化均属此列。通常将增强粒子数量大于 20%（体积分数）的材料称为粒子增强复合材料，含量较少时，称为弥散强化材料。

（2）纤维增强复合理论　强化效果取决于纤维的强度和弹性模量、纤维的含量、长短、排列方式以及基体本身的特性及两者界面间的物理、化学作用特点。为达到纤维增强的目的，不是任何纤维和基体都能进行复合，它们必须满足下列条件：

增强纤维的强度和弹性模量应远远高于基体。因为在产生相等应变的条件下，弹性模量高的能承受的应力也大。纤维弹性模量高，所以纤维增强材料主要靠纤维承受外加载荷。

纤维和基体之间应有一定的结合强度，这样才能保证基体所承受的载荷能通过界面传递给纤维，并防止脆性断裂。若结合强度过低，这时纤维毫无作用，犹如在基体中存在大量气孔群，不仅无强化作用，反而使整体强度大大降低；但结合强度也不能过高，因为复合材料受力破坏时，若纤维从基体中拔出，则要消耗能量，就可避免脆性断裂。而过高的结合强度会使纤维不能从基体中拔出，以致发生脆性断裂。所以纤维和基体的结合强度要适中。

纤维的排列方向要和构件的受力方向一致，才能发挥增强作用。因为纤维增强复合材料是各向异性的非均质材料，沿着纤维方向抗拉强度最高，而垂直纤维方向抗拉强度最低，所以纤维在基体中的排列和成型构件的受力应合理配合。

基体与纤维的热胀系数应当匹配，最好应使纤维材料的热胀系数略高于基体，这样可使复合材料中纤维处于受拉状态，而基体处于受压状态。

纤维和基体之间不能发生使结合强度降低的化学反应。

纤维所占的体积分数、纤维长度 L 和直径 d 及长径比 L/d 等必须满足一定要求，一般纤维所占的体积分数越高、纤维越长越细，增强效果越好。

12.4　纤维增强复合材料

12.4.1　纤维增强复合材料的特点

纤维增强复合材料之所以发展较快、应用较广是由于它具有下列优点：

（1）比强度和比模量高　这是复合材料最突出的特点。比强度、比模量高，这对要求减轻自重和高速运转的结构和零件是非常重要的。对于宇航、交通运输以及机械工程中高速运转的零件都希望尽量减轻自重而仍保持高的强度和高的刚度。也就是说应具有高的比强度和比刚度。纤维增强复合材料的比强度、比刚度是各类材料中最高的。不同增强材料与金属的性能比较见表 12-1。

表 12-1　不同增强材料与金属的性能比较

材料名称	相对密度	拉伸强度/GPa	弹性模量/$\times10^2$GPa	比强度/GPa	比模量/$\times10^2$GPa
钢	7.8	1.03	2.1	0.13	0.87
铝	2.8	0.47	0.75	0.17	0.26
钛	4.5	0.96	1.14	0.21	0.25
玻璃钢	2.0	1.06	0.4	0.53	0.21
碳纤维Ⅱ/环氧	1.45	1.5	1.4	1.03	0.965
碳纤维Ⅰ/环氧	1.6	1.07	2.4	0.67	1.5
有机纤维 PRD/环氧	1.4	1.4	0.8	1.0	0.57
硼纤维/环氧	2.1	1.38	2.1	0.66	1.0
硼纤维/铝	2.65	1.0	2.0	0.38	0.75

应该说明，纤维增强复合材料是各向异性非均质材料。由于纤维和基体是形状和性能完全不同的两种材料，它们之间的界面又具有分割作用，因此它不是连续和均质的，其力学性能是各向异性的。特别是长纤维或纤维制品增强的复合材料更为突出。因此在作强度、刚度设计时便不能完全照搬金属（连续、均质、各向同性体）的设计方法。

（2）抗疲劳性能好　由于纤维复合材料特别是纤维树脂复合材料对缺口、应力集中敏感性小，而且纤维和基体界面能够阻止疲劳裂纹扩展和改变裂纹扩展方向，因此复合材料有较高的疲劳极限。大多数金属的疲劳极限是拉伸强度的40% ~ 50%，而碳纤维增强的复合材料则可高达 70% ~80%。这是由于纤维增强复合材料中，裂纹的扩散过程和金属完全不同。金属材料疲劳破坏时，裂纹沿拉应力方向迅速扩展而造成突然断裂，裂纹的扩展方向是不会改变的。而纤维增强复合材料在承受纵向拉应力时，如基体中存在横向裂纹，则在拉应力作用下裂纹开始横向扩展，同时基体的横向受力面积减小，所承受的拉应力增加，因此在这个区域产生了纵向塑性延伸。为保持体积不变，在这个区域也要产生横向的缩短。这样的形变过程就造成基体和纤维之间产生剥离力使基体和纤维剥离或拉脱。故裂纹开始阶段是横向扩展，以后裂纹便转变方向沿着基体和纤维的弱界面扩展。由于裂纹方向改变，裂纹尖端的应力状态也发生了变化，在一定程度上阻止了裂纹的扩展。此外，由于纤维对基体的分割作用，使裂纹的扩展路程更为曲折，也促使疲劳强度提高。

（3）良好的破断安全性能　纤维复合材料中有大量独立的纤维，平均每平方厘米面积上有几千到几万根纤维，当纤维复合材料构件由于超载或其他原因使少数纤维断裂时，载荷就会重新分配到其他未破断的纤维上，因而构件不致在短期内发生突然破坏，故破断安全性好。

（4）减振性能好　因为结构的自振频率与材料的比模量的平方根成正比，而复合材料比模量高，其自振频率也高，高的自振频率就不易引起工作时的共振，这样就可避免因共振而产生的早期破坏。同时，复合材料中纤维及基体间的界面具有吸振能力，因此它的振动阻尼很高。对相同形状和尺寸的梁共同进行振动试验，即轻合金梁与碳纤维复合材料的梁同时起振，前者需要 9s 才能停止振动；而复合材料的梁只需 2.5s 就静止了，可见阻尼之高。

（5）耐高温性能好　由于增强纤维的熔点均很高（一般都在 2000℃以上），而且在高温条件下仍然可保持较高的高温强度，故用它们增强的复合材料具有较高的高温强度和弹性模量。特别是金属基复合材料，如铝合金，在 400℃时，弹性模量接近于零，强度值也从室温的 500MPa 降到 30 ~ 50MPa，而碳纤维或硼纤维增强铝合金复合材料，在 400℃时，强度和弹性模量几乎可保持室温时的水平。又如玻璃纤维增强复合材料可瞬时耐高温，故在火箭发动机上作耐烧蚀材料。

（6）成型工艺简便灵活及材料、结构可设计性强　对于形状复杂的构件，根据受力情况可以一次整体成型。减少了零件、紧固件和接头数目，材料利用率较

高，如用硼纤维增强复合材料。特别突出的是复合材料可以通过纤维种类和各种不同方向铺设的设计，使增强材料有效发挥作用。通过调整复合材料各组分的构成、结构及分配方式，既能使构件在不同方向承受不同作用力，而且还可以制得兼有刚性和韧性、弹性和塑性等矛盾性能的复合材料及多功能制品。

根据目前的技术水平，纤维增强复合材料也存在一些问题：如断裂伸长较小；抗冲击性差；横向强度和层间剪切强度较低；成本较高等。这些问题在一定程度上阻碍了复合材料的进一步推广，正在不断研究解决。

12.4.2　结构设计与强度复合

金属是均质各向同性材料。纤维增强复合材料（特别是长纤维及其制品的增强复合材料）是各向异性非均质材料，因此影响其性能的因素比金属更为复杂。一般来说，除了纤维和基体材料本身的性能以及它们之间界面的结合牢固程度之外，还和以下因素有关：

（1）纤维排列的方向　沿纤维排列方向受力最大。对玻璃纤维增强复合材料试验的结果表明，顺纤维方向比垂直方向的抗拉强度大 40 倍。

（2）纤维的细度与长度　纤维越细，本身的强度较高。在和基体材料复合时，纤维越细，比表面积越大，增强效果越好。纤维的长度同样也影响增强效果。

（3）增强纤维与基体材料之间体积的百分比（体积分数）　一般来说，纤维体积分数高，增强的效果越高。

根据以上因素，不难理解同种类的基体材料和增强纤维组成的复合材料其性能可能是不相同的。为了得到性能较为理想的复合材料制品，对长纤维或纤维制品组成的复合材料往往先要进行结构设计，合理地确定纤维的长度、细度、排列方向、体积分数等。

12.4.3　纤维增强复合材料品种简介

1. 玻璃纤维/树脂复合材料

由玻璃纤维与热固性树脂或热塑性树脂复合的材料是 20 世纪 40 年代发展起来的第一代复合材料。由于它具有强度高、价格低、来源丰富、工艺性能好等特点，至今仍广泛应用在国民经济各部门中。玻璃是二氧化硅和各种金属氧化硅为主要成分的共熔体，也是无定形的非晶体，呈脆性。但是，它经过高温熔化成液体，可以极快的速度拉制成纤维。玻璃纤维柔软如丝，比玻璃的强度和韧性高得多。纤维越细，强度越高，它的抗拉强度高达 1000 ~ 3000MPa，比高强度钢还高近两倍，比普通天然纤维高 5 ~ 30 倍。玻璃纤维的弹性模量为（30 ~ 70）× 10^3 MPa，约为钢的 1/3 ~ 1/6。由于它的相对密度为 2.5 ~ 2.7，因此它的比强度和比模量都比钢高。而且制取方便、价格低，是目前使用最多的增强材料。

按玻璃纤维中 Na_2O 和 K_2O 的含量不同，玻璃纤维又可分为无碱纤维（含碱量

低于2%），又叫做E玻璃纤维，中碱纤维（含碱量2%～12%）和高碱纤维（含碱量大于12%）。含碱量越高的纤维其化学稳定性、强度和电绝缘性能越差，尤其是对耐碱性较差的合成树脂会起破坏作用。因此，最好用无碱玻璃纤维制作复合材料。

玻璃纤维与热塑性塑料组成的复合材料称为玻璃纤维增强塑料。它比普通塑料具有更高的强度和冲击韧性。其增强效果因树脂的不同而有差异，以尼龙的增强效果最为显著，聚碳酸酯、线型聚酯、聚乙烯和聚丙烯的增强效果也较好。

玻璃纤维增强塑料分为长纤维增强与短纤维增强两类。前者是一束平行排列的纤维为树脂所包围；后者纤维均匀而不定向地分布于树脂之中。长纤维增强塑料可得到较高的抗拉强度和冲击韧性，但成型加工不及短纤维增强塑料方便。

玻璃纤维或玻璃纤维制品与热固性树脂的复合材料通常叫做热固性玻璃纤维增强复合材料 。常用的树脂是：环氧树脂、酚醛树脂、聚酯树脂以及有机硅树脂。几种树脂浇注品的物理、力学性能的对比见表12-2。热固性玻璃纤维增强复合材料集中了其组成材料的优点，即质量轻，比强度高，耐蚀性好，介电性能优越，成型性能良好。它们的比强度比铜合金和铝合金高，甚至比合金钢还高，但刚度较差，只为钢的1/10～5/10，耐热性不高（低于200℃），容易老化，容易蠕变。

表12-2　几种树脂浇注品的物理、力学性能的对比

项目	酚醛树脂	环氧树脂	聚酯树脂	有机硅树脂
相对密度	1.30～1.32	1.15	1.1～1.46	1.7～1.9
抗拉强度/MPa	42～63	84～105	42～70	21～49
抗弯强度/MPa	77～119	108.3	59.5～119	68.6
抗压强度/MPa	87.5～150	150	91～169	63～126
线胀系数/（10^{-6}/℃）	60～80	60	80～100	308
吸水率（%，24h）	0.12～0.36	1.1	0.15～0.6	—
收缩率（%）	8～10	1～2	4～6	4～8

玻璃纤维还可以和热塑性树脂如尼龙、聚烯烃类、聚苯乙烯类、热塑性聚酯和聚碳酸酯等材料复合，制成热塑性玻璃纤维增强复合材料。热塑性玻璃纤维增强复合材料的玻璃纤维直径一般为5～9μm，玻璃纤维柔软如丝，比玻璃的强度和韧性高得多。而且纤维越细，强度越高，其抗拉强度可高达1000～3000MPa，比高强度钢还高出两倍，耐热性高（250℃以下力学性能变化不大），化学稳定性好。主要缺点是脆性较大。但若与合成树脂结合在一起，便能形成具有较佳性能的玻璃纤维增强复合材料。

热塑性玻璃纤维增强复合材料同热塑性塑料相比，基体材料相同时，强度和疲劳性能可提高2～3倍以上，冲击韧性提高2～4倍，蠕变强度提高2～5倍，达到或超过了某些金属的强度。例如，40%玻璃纤维增强尼龙的强度超过了铝合金而接

近于镁合金的强度。因此可以用来取代这些金属。

玻璃纤维增强复合材料的主要缺点是弹性模量小，只有钢的1/5～1/10。因此，玻璃纤维增强复合材料用作受力构件时，往往强度绰绰有余，而刚度则较差，易产生变形，在设计时必须引起注意，并从结构设计上来弥补弹性模量小的缺点。此外，玻璃纤维增强复合材料还有耐热性差、易老化和蠕变的缺点。

玻璃纤维增强复合材料的性能随树脂的种类而异，例如：酚醛树脂玻璃纤维增强复合材料不仅价格便宜，而且耐高温，有良好的综合性能，但成型工艺性差(需要高温、高压)，环氧玻璃钢的强度高、粘着牢固、断面收缩率小；聚酯玻璃纤维增强复合材料成型工艺性能好，能在低压常温下固化。

玻璃钢应用极广，常用于要求自重轻的受力构件，例如汽车车身、直升飞机的旋翼。也用于要求耐腐蚀的结构件，如要求耐海水腐蚀的结构件和轻型船体，如游船、舰艇，尤其适合于制造扫雷艇。因为它不受电磁作用的影响，可避免磁性水雷的袭击。它也可用作石油化工的管道、阀门、各种车辆的车身及配件；各种耐腐蚀的管道、阀门、贮罐、高压气瓶、撑杆、防护罩以及轴承、法兰圈、齿轮、螺钉、螺母等各种机械零件和机械设备。玻璃纤维增强复合材料作为一种优良的工程材料，正越来越多地应用于国民经济各部门中，已成为工程上不可缺少的重要材料之一。

2. 碳纤维/树脂复合材料

碳纤维复合材料是20世纪60年代迅速发展起来的。

碳元素具有同素异构现象，常见的有无定形碳、石墨和金刚石。由于分子结构不同，性能差异很大。前者几乎没有强度，后者则具有很高的强度和硬度。石墨的分子结构是层状的六方晶体结构，呈现各向异性：平行于层面方向的强度和弹性模量高，而垂直于层面方向的强度和弹性模量则较低。碳纤维就是一种由许多石墨晶体组成的多晶纤维，尽管这些晶体在纤维内的排列是不规则的，但为获得高强度和高模量的碳纤维，希望纤维中石墨层面的方向平行于纤维轴线方向。通常，把石墨晶体层面和纤维轴线的交角叫取向角。碳纤维中石墨晶体规整度高、取向角小，则机械强度和弹性模量高。

碳纤维是用人造纤维为原料，在隔绝空气的条件下经高温炭化而成的。用作碳纤维的原料要求在加热升温时不熔化、不剧烈分解。工业上常用的原料是腈纶、沥青和人造粘胶纤维。它们在200～300℃的空气中并施加一定的张力进行发蓝处理，然后在氮气的保护下，在1000～1500℃的高温下进行炭化处理，即可制成含碳量为85%～95%的碳纤维。

如果将碳纤维在2500～3000℃的高温下，在氮气中进行石墨化处理，则碳纤维中的石墨晶体沿着纤维方向的排列会更加整齐，从而提高了弹性模量。经过石墨化处理的碳纤维又称石墨纤维或高模量碳纤维。

与玻璃纤维相比，碳以石墨方式出现，是六方晶体结构，六方底面上的原子以

强大的共价键结合，所以碳纤维比玻璃纤维具有更高的强度，更高的弹性模量，其抗拉强度比玻璃纤维略高，而弹性模量则是玻璃纤维的 4 ~ 6 倍。玻璃纤维在 300℃以上时的强度会逐步下降，碳纤维在达到 2000℃以上的高温下强度和弹性模量基本上保持不变；在 -180℃以下的低温下也不变脆。碳纤维的比强度和比模量是一切耐热纤维中最高的。所以，碳纤维是比较理想的增强材料，可用来增强塑料、碳、金属和陶瓷等。

碳纤维通常和环氧树脂、酚醛树脂、聚四氟乙烯等组成复合材料。它们不仅保持了玻璃纤维增强复合材料的许多优点，而且许多性能优于玻璃纤维增强复合材料。这类材料的密度比铝轻，强度与钢接近。弹性模量比铝合金大，疲劳强度高，冲击韧性高，同时耐水和湿气，化学稳定性高，导热性好，受 X 射线辐射时其强度和模量不变化等。它还具有优良的耐磨减摩性及自润滑性、耐腐蚀、耐热等优点。因此它的比强度和比模量在现有复合材料中名列前茅。碳纤维/环氧复合材料的强度和弹性模量都超过铝合金而接近于高强度钢，完全弥补了玻璃纤维增强复合材料弹性模量小的缺点。此外，玻璃纤维增强复合材料由于弹性模量低，应变量也相应较大，当应变到 1% ~2% 时，树脂要发生碎裂。因此，设计玻璃纤维增强复合材料零件时，其允许承载应力不超过极限应力的 60%。而碳纤维则因弹性模量大，设计时可以允许在极限应力条件下使用。另外，在高温老化试验中，碳纤维增强复合材料的强度损失也比玻璃钢小。因此，碳纤维增强复合材料可以制作宇宙飞行器的外层材料，人造卫星和火箭的机架、壳体、天线构架；在机械工业中，碳纤维增强复合材料用作承载零件（如连杆）和耐磨零件（如活塞、密封圈）以及像齿轮、轴承等承载耐磨零件。它还用作有耐腐蚀要求的化工机械零件，如容器、管道、泵等。但这类材料不足之处是，碳纤维与树脂的粘结力不够大，各向异性程度较高，耐高温性能差等。

3. 碳纤维/碳复合材料

它是以碳或石墨作基体，用碳纤维或石墨纤维增强的新型特种工程材料。它能承受极高的温度和加热速度，用作烧蚀防热材料。在航天、航空中用于制造导弹鼻锥、飞船的前缘、超音速飞机的制动装置等，以及航天飞机的超高温部位和大型火箭的喷管上（喷管口部的工作温度超过 3000℃）。

4. 碳纤维/金属复合材料

碳纤维/金属复合材料是处于研制阶段的一种新型高级复合材料，碳不易被金属润湿，在高温下容易生成金属碳化物，所以这种材料的制作比较困难。现在主要用于制作熔点较低的金属或合金碳纤维复合材料。在碳纤维表面镀铝，制成了碳纤维铝基复合材料。当温度接近于金属的熔点时还可保持高的弹性模量，在 600℃高温下仍能保持其强度。用碳纤维和铅锡合金制成的复合材料，是一种减摩性能比铅锡合金更优越、强度更高的高级轴承材料。碳纤维增强铝合金复合材料不仅具有较高的强度和弹性模量，更重要的是改善了金属的高温性能。即有较高的高温强度和

模量，在温度较高时有较好的尺寸稳定性，因此提高了零件的使用温度。同时还具有较好的可加工性和连接性能，不会老化等优点。已用于卫星、宇航方面的结构件。但由于碳纤维与金属界面的润湿性差，碳纤维中的碳在高温时极易与铝生成脆性的碳化铝，因而降低了结合强度，所以尚有许多生产技术问题有待研究。

5. 碳纤维/陶瓷复合材料

陶瓷一类的无机材料在耐热、抗氧化、耐磨、耐腐蚀、电性能等方面有很多突出的优点，但是抗机械冲击、抗热震性能较差，“脆性”是致命的弱点。用碳纤维与陶瓷组成复合材料能大幅度地提高断裂功和抗热震性能，改善陶瓷的脆性。而陶瓷又保护了碳纤维，使它在高温下不受氧化，因而具有很高的高温强度和弹性模量。如碳纤维增强的氮化硅陶瓷可在1400℃的温度下长期使用，可用作喷气飞机的涡轮叶片。又如碳纤维增强石英陶瓷复合材料，抗冲击强度比纯烧结石英陶瓷大40倍，抗弯强度大5～12倍，比强度、比模量有成倍的提高，能承受1200～1500℃的高温气流的冲击，是一种很有前途的新型复合材料。

6. 硼纤维增强复合材料

除玻璃纤维和碳纤维之外，工程上尚采用了硼纤维与树脂或金属组成复合材料。硼纤维是一种新型纤维材料，其比强度和玻璃纤维差不多，而弹性模量几乎为玻璃纤维的5～7倍，在无氧化气氛条件下的耐热性为1000℃。

硼纤维增强复合材料是以环氧树脂、聚酰亚胺树脂、聚苯并咪唑为基体，以硼纤维为增强材料的复合材料，各向异性十分明显，其纵向与横向的抗拉强度和弹性模量的差值，高达数十倍，因此常用多向叠层复合材料。

硼纤维树脂复合材料的主要缺点是抗冲击性能差。另外加工困难，成本昂贵，故它的应用和发展受到限制。

硼纤维增强复合材料主要在航天航空工业上。美国已把硼纤维环氧树脂复合材料应用于F－15战斗机重要构件，大型导弹级间段，轨道飞行器一号系统的隔离装置接合器等部件。由于技术上的原因，硼纤维复合材料的应用远不及玻璃纤维和碳纤维普遍。

7. 其他纤维增强复合材料

近年来用晶须代替纤维组成的复合材料发展很快。晶须是一种单晶纤维，它是金属或陶瓷自由长大的针状单晶体，直径在30μm以下，长度约为几毫米。由于它不存在晶体缺陷，它的强度极高，可接近于原子结合力的理论强度。目前已有小批量生产的氧化铝、氮化铝和氮化硅几种晶须。由于它的成本高，因此多用于尖端工程。有时也用晶须作为玻璃纤维增强复合材料制品的辅助增强材料，在应力特别高的部位上撒上晶须，使该部位局部增强。

高强度高模量的有机纤维——芳纶14（国外叫PRD或Kevlar）。它的相对密度是所有增强纤维中最小的，强度略高于玻璃纤维，弹性模量为玻璃纤维的两倍。与无机纤维相比，富有韧性、断裂伸长大，因此有较好的抗冲击性能。它与环氧树脂

等组成复合材料已在飞机、宇航器等方面得到应用。

12.5 层合复合材料

层合复合材料是由两层或两层以上不同材料结合而成的。其目的是为了将组分层的最佳性能组合起来以得到更为有用的材料。用层合法增强的复合材料可使强度、刚度、耐磨、耐腐蚀、绝热、隔声、减轻自重及阻隔性等若干性能分别得到改善。

12.5.1 双层金属复合材料

双层金属复合材料是将性能不同的两种金属，用胶合或者熔合铸造、热压、焊接、喷涂等方法复合在一起以满足某种性能要求的材料。最简单的双层金属复合材料是将两块具有不同热胀系数的金属板胶合在一起。用它组成悬臂梁，当温度发生变化后，由于热胀系数不同而产生预定的翘曲变形，从而可以作为测量和控制温度的简易恒温器，双金属片如图 12-1 所示。此外，我国已生产的不锈钢—普通钢复合钢板、合金钢—普通钢复合钢板也是典型的层合复合材料。

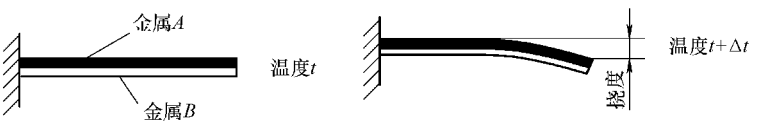


图 12-1 双金属片

12.5.2 塑料/金属多层复合材料

SF 型三层复合材料是以钢为基体，烧结铜网或铜球为中间层、塑料为表面层的一种自润滑材料，如图 12-2 所示。它的物理力学性能主要取决于基体，而摩擦磨损性能主要取决于塑料。中间层为多孔性青铜，它使三层材料之间获得可靠的结合力，胜于一般喷涂层和粘贴层。一旦塑料磨损，露出青铜，也不致严重磨伤轴。常用于表面层的塑料为聚四氟乙烯（如 SF1－1 型）和聚甲醛（如 SF1－2 型），这种复合材料常用作无油润滑轴承。据资料报导，它比用单一的塑料承载能力提高 20 倍，热导率提高 50 倍，热胀系数降低 75%，从而改善了尺寸稳定性，提高 pv 值 20 倍左右。可用作高应力（140MPa）、高温（270℃）及低温（－195℃）和无油润滑条件下的各

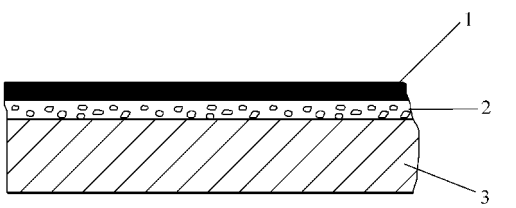


图 12-2 三层复合板

1—塑料层 0.05～0.3mm 2—多孔性铜 0.2～0.3mm 3—钢 0.5～3mm

种轴承。目前已用于汽车、矿山机械、化工机械等方面。

12.5.3　夹层结构复合材料

它是由两层薄而强的面板（或称蒙皮）中间夹着一层轻而弱的芯子组成，夹层结构如图 12-3 所示。面板是由抗拉、抗压强度高，弹性模量大的材料组成，如金属、增强塑料等。芯子的结构有两类，一是实心的，一是蜂窝格子的。芯子材料根据要求的性能而异，常用泡沫塑料或木屑、石棉等。蜂窝格子常用金属箔等。面板与芯子的连接方法一般用胶粘剂胶接，金属材料可用焊接。

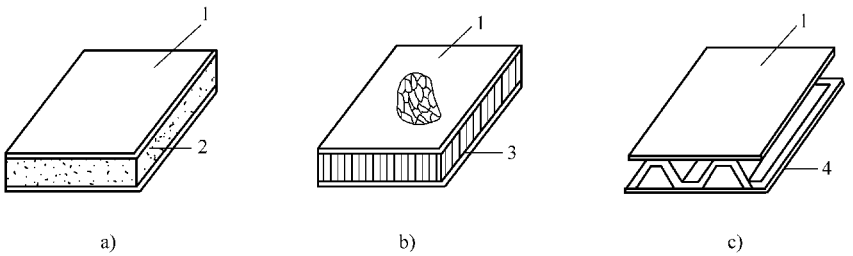


图 12-3　夹层结构

1—面板　2—泡沫塑料　3—蜂窝　4—折板

夹层结构的特点是：

1）相对密度小，减轻了产品结构重量。

2）它的结构和工字钢相似，面板相当于工字钢的翼缘，芯子相当于工字钢的腹板，具有较高的刚度和抗压稳定性。

3）可以根据需要选择面板和芯子的材料，以得到所需的性能，如绝热、隔声、绝缘等性能。

夹层结构复合材料的性能与面板的厚度、夹芯的高度、蜂窝格子的大小或泡沫塑料的性能等有关。通常，蜂窝夹层结构的耐热性和机械强度比泡沫夹层结构高。因此，对于结构尺寸大、要求强度高、刚度好、耐热性好的受力构件应采用蜂窝夹层结构；而对于受力不太大，但要求结构刚度好，尺寸较小的受力构件可采用泡沫塑料夹层结构。

夹层结构复合材料已用于飞机上的天线罩隔板、机翼以及火车车厢、运输容器等方面。

12.5.4　塑料软包装复合薄膜和片材

许多种类的食品要求包装材料必须具备多功能性，如阻湿、阻气、阻香、阻光及为适应机械包装而需要有一定的强度等，同时还要求包装薄膜的成本低。单一的塑料薄膜很难满足各方面的要求。将具有各种不同性能的塑料薄膜复合起来，可制得性能全面的复合软包装薄膜。

塑料复合包装薄膜的优点：①综合性能好，具有构成复合薄膜的所有单膜的性能，并具有某些特殊的性能。例如真空包装和充气包装等要求阻气、力学性能等多种性能都好的包装，必须用复合薄膜，复合软包装材料还具有良好的热封性。②装潢效果好且卫生可靠，可将装潢图案印刷于中间层上（夹层印刷），使印刷油墨不会污染被包装物，还能保护装潢图案在运输及使用时不被磨损。③复合薄膜的强度均高于所用基膜强度，故其机械适应性更强。

复合薄膜的主要缺点是由于其为多种材料制成，包装废弃物回收利用时分离困难，不易获得较纯的树脂，故回收再利用性差。

1. 复合包装薄膜组合原则

食品包装用复合薄膜的组合原则是，在复合工艺允许的条件下，将几种不同的塑料单膜（也可加入铝箔、纸等非塑性材料）复合起来，互相取长补短，发挥组成复合薄膜的不同材质优点，使之具有新的更好、更全面的性能。

1）内层要求无毒、无味，耐油、耐化学性好，具有热封性或粘合性。

2）外层要求具有光学性能好、印刷性好、耐磨、耐热，具有较高的强度和刚性。

3）如果要求较高的阻隔性，还可再加上高阻隔的中间层或增加层数，制成三层或四层以致更多层数的复合薄膜。

复合薄膜的表示法通常是将外层材料写在前边（左边），然后依次写上中间层，最后边（右边）为内层材料。

2. 复合包装薄膜加工方法

（1）涂层（粘合层） 在基材单面或双面涂一薄层另外的熔体或乳液状的材料，主要作用是增加对基材的可热合性能和改善其阻隔性能。通常的热合材料为聚乙烯或醋酸乙烯。PVDC 共聚物既可以用来阻隔也具有可热合性能。

挤出涂布工艺类似平挤薄膜的生产工艺，不同点是在挤出涂层工艺中，熔融的聚合物涂覆在薄膜、纸、纸板或铝箔等基材上，而不是在铬辊上。为获得良好的粘合，要求涂层和基材必须有足够好的相容性。

（2）复合 就是将几种单独基材连接在一起形成复合体的工艺，单层基材通常是塑料、纸或铝箔，并且有的复合工艺也能用许多方法实现。

有的复合膜依靠粘合剂将基材粘在一起，形成一个单一结构，粘合剂本身是溶剂型的或水基型的，从发展的观点看，水基粘合剂将占主导地位。在“湿法”复合过程中，先将粘合剂涂到一个基材上，再和另一种基材粘在一起，然后将复合好的材料放在烘道中干燥，蒸发掉粘合剂中的溶剂，完成复合工艺。为使该工艺得以实施，基材之中必须有一层是多孔的，以便水或有机溶剂能挥发出来。

在“干法”复合的过程中，先把粘合剂涂布到单独的基材上，进入烘道进行干燥，然后把第二种基材与第一种基材复合。

在热熔复合工艺中，先对 100% 的固体热熔粘合剂加热，直到其熔化，再将其

涂布到基材上，随着热熔粘合剂的冷却便把它们粘合在一起了。

在挤出复合中，熔化的聚合物在冷却以后在两个基材之间产生粘性。在挤出复合过程中，聚乙烯等聚合物在挤出机中熔融，在热复合过程中，热量熔化了一个基材上预先涂布的热熔粘合剂层，随后同第二种基材粘在一起。

（3）共挤出　共挤出薄膜是由多层塑料薄膜组成的，采用平挤或吹胀工艺使两种以上塑料由一步法成型，特点是薄膜的基材不易分开。其制造方法是每一种树脂分别在独立的挤出机中熔融塑化，然后塑化的熔体通过共挤出机头，并使它们保持在均匀一致的各层中而不混合。在设计共挤工艺时，为防止层与层之间的混合，应认真考虑聚合物的流变学，尤其是流动方式和熔体粘性。

由于是多层材料共挤，如果两种聚合物之间的粘性不够，将影响共挤薄膜的整体粘合效果，也就是层与层在一定的条件下有可能分开。若出现这种情况，就要加入粘合层，粘合层从本质上讲也是一种热塑性粘合剂，靠粘合层保持了多层材料的整体性。粘合层也必须在一个专用的挤出机中熔化，作为单独增加的一层送入共挤机头。因此许多共挤材料是三层结构，两种是塑料，第三种是粘合层，这一层为前两种材料的粘接材料。在结构上超过四层的共挤膜也是很常见的，比如，如果EVOH包含在其中作为高阻隔层，那么它一定是夹在两种聚合物之间以防潮气渗透，这样加上粘合层，应当至少是五层结构。

共挤薄膜或片材在包装行业被广泛地使用。如具有内、外表面不同粘合特性的缠绕裹包薄膜；内层为防光照射的褐色或黑色聚乙烯、外层是白色的聚乙烯共挤膜制成的牛奶袋；为改善热合性能，在聚丙烯中复合醋酸乙烯或低密度聚乙烯膜等。

12.6　颗粒复合材料

颗粒复合材料是由一种或多种材料的颗粒均匀分散在基体材料内所组成的材料。例如金属学中讲过的弥散强化的金属材料就是一种颗粒复合材料。不过它的增强粒子有的是人工加入的，有的是热处理过程中析出第二相形成的。

颗粒复合材料的增强原理是利用大小适宜的增强粒子呈高度弥散分布在基体中，以阻止基体塑性变形的位错运动（金属材料）或分子链的运动（高分子材料）。增强粒子直径的大小直接影响增强效果。增强粒子直径太小则形成固溶体，增强粒子直径太大容易引起应力集中，增强效果下降。金属增强粒子的直径在0.01～0.1μm范围时增强效果最好。

金属陶瓷是常见的一种颗粒复合材料。一般金属及其合金的热稳定性好、延展性好，但在高温下易氧化和蠕变；陶瓷则脆性大、热稳定性差，但是耐高温、耐腐蚀。为取长补短，将陶瓷微粒分散于金属基体中，使二者复合为一体即是金属陶瓷。

金属陶瓷中的陶瓷相主要是氧化物（Al_2O_3、MgO、BeO）和碳化物（TiC、

SiC、WC)；金属基体主要是 Ti、Cr、Ni、Co、Mo、Fe 等。例如，常用的硬质合金刀具便是 WC 陶瓷和 Co 金属组成的一种金属陶瓷材料。

金属陶瓷具有高硬度、高强度、耐磨损、耐腐蚀、耐高温和膨胀系数小等优点，是一种优良的工具材料。

除金属陶瓷外，还有石墨—铝合金颗粒复合材料。这是在铝液中加入颗粒状石墨并悬浮于铝合金中，浇得的铸件具有优良的减摩消振性能和较小的密度，是一种新型的轴承材料。

除纤维、层合、颗粒复合材料之外，工程上尚有许多多相复合材料。层合纤维增强复合材料既是层合的，又是纤维复合的复合材料。多相复合材料比之前所述的复合材料有更多的特性。

12.7 复合材料的应用

复合材料由于具有优良的力学物理性能，引起人们广泛的关注。国内、外对复合材料的开发研究进展迅速。复合材料的品种不断增加，应用范围十分广泛，从军工到民用，从尖端技术到一般技术，在国民经济和国防建设中发挥着重要的作用。

(1) 在航天和航空方面的应用　航天和航空飞行器需要比强度高、比模量大的耐高温材料，而先进的复合材料就显示出最大的优越性。

使用纤维增强树脂基复合材料来制作火箭发动机壳体，经实际使用，性能良好。又应用在其他类型的火箭和导弹发动机上，重量比金属的减轻了 45%，射程由原来的 1600km 增加到 4000km。导弹的弹头由金属蜂窝增强陶瓷材料制成。航天飞机大量采用了树脂基、金属基复合材料。最大的结构件是中部机身舱门，宽 4.57m、长 18.29m，为蜂窝夹层结构，其面板为石墨/环氧层压复合材料，夹芯为酚醛树脂蜂窝结构。宇宙飞船的圆形着陆缓冲器是填充聚氨酯泡沫塑的铝蜂窝夹层结构。

在航空工程上应用，如装在发动机风扇叶片及直升机上的压气机叶片是用碳纤维增强树脂基复合材料制造的。玻璃纤维增强复合材料螺旋桨在飞机上使用的较早，另外防弹油箱、起落架、机门、坐椅、行李架、隔板也是用玻璃纤维增强复合材料制成的。

(2) 在造船方面的应用　由于玻璃布增强树脂基复合材料质轻、强度高、耐海水腐蚀、抗微生物附着性好、能吸收撞击能、设计和成型工艺较简单和自由，所以应用很广。玻璃纤维增强复合材料深水潜艇和深水调查船，其潜水深度分别为 4500m 和 9000m。

玻璃纤维增强复合材料可以用于制作各种船、艇，如气垫船、各种工作艇、小型舰艇（如巡逻艇、登陆艇、交通艇、消防艇等)。玻璃纤维增强复合材料还可用于舰艇上层建筑、配件或各种船的组装件，如甲板、风斗、风帽、油箱、方向舵、仪表盘、推进器、大型导流帽、救生圈、驾驶室、浮鼓、蓄电池箱、气缸罩、机棚室等。

（3）在车辆方面的应用　复合材料代替钢材制造火车、汽车、拖拉机的车身、车顶、车门、窗框、车厢等。玻璃纤维和碳纤维混杂纤维增强热固性复合材料整体成型比赛用汽车。其他汽车上使用复合材料约占总重量的20%。用聚芳酰胺纤维增强树脂基复合材料制造的制动片，其性能优于石棉增强复合材料。

（4）在电器设备上的应用　用玻璃纤维增强复合材料制造重型发电机的护环，不仅工艺简单、价格低廉，而且其性能优于原用的无磁钢护环。一台6000kW的汽轮发电机使用的纤维增强树脂基复合材料制的零部件就有1800多件。电机上的端盖、定子槽楔；大型变压器上的线圈绝缘筒和衬套；熔断器管和绝缘筒；电流互感器的绝缘管和绝缘子；各种绝缘板、集电环、整流子滑环、绝缘梯、继电器绝缘垫以及绝缘操作杆等都是玻璃纤维增强复合材料制造。

（5）在化学工程上的应用　腐蚀是化工和石油部门最关心的问题。为此世界各国都在寻求新材料代替金属材料，减少腐蚀，延长石油化工设备的使用寿命。

纤维增强树脂基复合材料具有耐酸、耐碱、耐油和耐其他介质腐蚀等特点，所以广泛用来制造各种贮罐、容器、反应釜、运输槽车、冷却塔、酸洗槽、高位槽、液体输送管道、排气和排烟管道、风机叶片等各种化工设备，取得了相当大的效果。

（6）兵器工业上的应用　复合材料在常规武器上的应用越来越多。由于材料复合后，所组成的新材料具有独特的物理力学性能，能最大限度地满足常规武器装备上的要求。

坦克装甲上的应用，在坦克装甲内层衬以聚芳酰胺增强树脂基复合材料，可大大降低中子流辐射穿透强度，减少对坦克驾驶员的杀伤力。另外这种材料密度小、抗冲击、抗切割的能力强，是抗穿甲弹和抗破甲弹的好材料。

武器装备上的应用，用纤维增强树脂基复合材料制成炮弹箱，不但重量轻且防潮。

打靶用炮弹弹壳、枪支的枪托、手枪把以及盔帽都可用纤维增强树脂基复合材料制作，重量轻、强度高、工艺简单、外形美观。

（7）医学上的应用　用纤维增强树脂基复合材料制造假肢，不但重量轻、强度高、制造工艺简单，而且价格低廉。在整形外科手术中用纤维增强树脂基复合材料制造关节；用氧化铝晶须增强陶瓷作假牙。

（8）体育器材上的应用　撑杆跳高的撑杆是由石墨纤维增强环氧树脂基体复合材料制造的，其强度高、模量高。网球球拍、羽毛球球拍杆、高尔夫球棒、跳板、弓等都可用复合材料制造。

（9）其他方面的应用　如硬币、乐器、包装材料都可用复合材料制造。

当前复合材料在工程结构中占有越来越重要的地位，在航天、航空工业及汽车工业中尤为重要。特别对于某些特殊需要，例如航天飞行器重返大气层要承受高温烧蚀、高速气流冲刷，只有复合材料才能满足上述要求，这是单一材料无法代替的。

第 13 章　材料的选用

13.1　选材的原则与方法

现在，工程材料的种类已经达到上万种，实现工业化生产的也不下几千种。材料的选用就是在这众多的材料品种中，选择一个合适的品种。可供选择的材料品种很多，但实际上并不是所有工业化的材料品种都获得了具体应用，本书已介绍的材料品种接近百种，但是，在具体应用中，最常用的材料品种也不外乎这近百种。本书所讨论的材料选用，主要是在本书已介绍的常用材料品种中选用。选择范围不是很广，往往只局限于几个品种之间。

在实际选用过程中，有些材料在性能上十分接近，究竟选择哪一种更为合适？需要多方考虑、反复权衡，才可以确定下来。因此，材料的选用是一项十分复杂的工作，可遵循的规律并不十分明显。

有一点需要特别注意，就是从各种书刊上引用的材料性能数据，都是在特定条件下测定的，这些条件可能与实际工作状态差别较大。读者在引用时一定要注意与自己的使用条件和使用环境是否相吻合，如不吻合则要将所引数据转换成实际使用条件下的性能或按实际使用条件重新测定。例如，塑料材料的各种强度都是在一定温度下测定的，不同温度下的强度值差别很大；再如，塑料的热变形温度都是在一定负荷下测定的，在选用时一定要注意两者的负荷是否吻合。

面对一个需要开发的新产品或零件的设计图样，选材应遵循如下步骤。首先要确定这个产品可选用哪类材料来制造；其次，如果确定可用的材料种类后，究竟选用这类材料的哪个品种以及用哪种方法制造。

究竟如何选用材料呢？我们应该从以下方面考虑。

1）制品要求的使用性能：

制品的使用条件：①受力条件；②透过性；③透明性；④精度及外观等。

制品的使用环境：①环境温度、环境湿度；②接触介质及环境的光、氧、辐射等。

2）原料的加工性能：

①加工难易性；②加工成本；③加工废料；④加工精度；⑤加工形状。

3）制品的成本

4）原料的来源

考虑以上各种因素后，再将各种材料的性能进行比较。不同品种材料的性能比

较见表 13-1。

表 13-1　不同品种材料的性能

材料 / 性能	钢	铝	铜	玻璃	陶瓷	木材	HDPE	PC	30% GF PA610
相对密度	7.8	2.8	8.4	2.6	2.10 ~ 2.94	0.28 ~ 0.9	0.95	1.21	1.45
线胀系数/ $\times 10^{-5}K^{-1}$	1.2	2.4	1.8	0.58	0.3 ~ 0.6	0.9 ~ 2.4	13.4	7.0	3.28
热导率 /[10^2W/(m · K)]	0.6	2.1	3.8	0.5	0.4	0.0011	0.0044	0.019	0.022
拉伸强度/MPa	550	470	390	6 ~ 8	20 ~ 260	—	29	65	256
冲击强度/（J/m）	70	168	46	脆	脆	—	30	54	177
比强度	70	168	46	3	10 ~ 86	—	30	54	176

从表 13-1 中可以看出，不同材料的性能大不相同。在强度方面，以金属材料最好，特种陶瓷和纤维增强工程塑料次之；在比强度方面，以金属铝和增强工程塑料最好；冲击强度以金属、塑料为好；在耐热方面，以陶瓷、金属和玻璃最好，塑料次之，木材最小；密度以塑料和木材最小，木材中以泡桐最轻，塑料中以泡沫塑料最轻；线胀系数以塑料最大，陶瓷最小；导热性以塑料、木材最小，玻璃、陶瓷次之，金属最大。

常见的金属材料和塑料材料可以满足一般零件要求的 90% 以上。余下的 10% 可以由专业材料研究人员解决。

下面分别以金属材料和塑料材料为例介绍选择材料的过程。

13.2　金属零件的选材

13.2.1　选材的一般原则

金属零件的选材合理与否直接影响产品的质量、寿命和生产成本，选材的依据是零件的使用性能和失效分析结果。选材的一般原则是，首先保证使用性能，同时兼顾工艺性和经济性。

所谓使用性能是指零件在工作时应具备的力学性能、物理性能和化学性能。不同零件所要求的使用性能也不同，因此，选材的首要任务是准确判断零件所要求的使用性能，然后再确定所选材料应具备的主要性能指标及具体数值并进行选材。具体方法如下：

（1）分析零件的工作条件，确定使用性能　工作条件主要指：①零件的受力情况，包括受力形式，如载荷形式（拉、压、弯曲或扭转等），载荷性质（如静载、动载、交变载荷）及承受摩擦的状况；②环境状况，如工作温度、介质等；

③特殊要求如导热性、导电性、导磁性等。在工作条件分析的基础上确定使用性能。如重要传动齿轮，受交变弯曲应力、交变接触应力、冲击载荷及摩擦等，应把疲劳强度、抗弯强度、接触疲劳抗力、硬度作为主要使用性能。

（2）进行失效分析，确定使用性能　失效分析就是要找出产生失效的主导因素，为较准确地确定零件的主要使用性能提供经过实践的可靠依据。如长期以来，人们认为发动机曲轴的主要使用性能是高的冲击抗力和耐磨性，应选 45 钢制造，通过失效分析发现，曲轴的失效形式主要为疲劳断裂，其主要使用性能为疲劳抗力。因此，以疲劳强度为主要使用性能指标设计、制造的曲轴，不仅质量和寿命显著提高，而且可以选用价格低的球墨铸铁制造。

（3）从零件的使用性能要求提出对材料的性能要求　明确了零件的使用性能后，并不能马上按此进行选材，还要把使用性能的要求，通过分析、计算量化成具体数值，再按这些数值，从手册中给出的材料性能数据大致应用范围选材。常规的力学性能指标有 HRC 或 HBW、A_e、R_m、δ_ψ、α_H 等。对于非常规的力学性能指标，可通过模拟实验或查找有关资料相应的数据进行选材。除了依据力学性能外，对高温和腐蚀介质中工作的零件，还要求有良好的抗氧化性和耐蚀性；有些特殊性能要求，如电性能、磁性能、热性能等。则要依据材料的物理性能和化学性能选材。

13.2.2　工艺性原则

金属材料工艺性的好坏对零件加工的难易程度、生产效率、生产成本关系很大。因此很有必要再从满足使用性能的材料中按材料的工艺性进一步选择。金属材料的工艺性通常指以下几方面：

（1）铸造性能　它包括流动性、收缩性、偏析等。

（2）压力加工性能　包括冷压力加工（如冷冲压、冷轧、冷挤压等）和热压力加工（如锻造、热轧、热挤压等）时材料的塑性和变形抗力及可热加工的温度范围、抗氧化性和加热、冷却要求等。变形铝合金、铜合金、低碳钢的压力加工性能好，而高碳钢就差。

（3）焊接性能　是指焊缝处形成冷裂或热裂及形成气孔的倾向，低碳钢的焊接性能好，高碳钢及铸铁的焊接性能差。

（4）切削加工性能　是指材料的切削加工性、磨削加工性等，一般用切削抗力、零件的表面粗糙度值的大小、刀具磨损和切屑排除的难易程度来衡量其好坏。

（5）热处理工艺性能　包括淬透性、淬硬性、耐回火性、氧化脱碳倾向、变形开裂倾向等。碳素钢的淬透性差，强度较低，合金钢比碳素钢的热处理工艺性好，故结构复杂或尺寸较大且强度要求较高的零件要选用合金钢。

13.2.3　经济性原则

在满足使用性能和工艺性的前提下，选用的材料要价格便宜、成本低廉。除考

虑材料本身的价格外，还要考虑加工费用和管理费用。

（1）材料的价格　因为材料成本约占零件成本的 30% ~70%。我国常用金属材料的相对价格见表 13-2，从表中看出，碳素钢和铸铁的价格是比较低廉的。

（2）材料的加工费用　加工费用占零件成本的 30% 左右，生产批量越小，所占比例越高。常用热处理方法的相对加工费用见表 13-3。

表 13-2　我国常用金属材料的相对价格

材料	相对价格	材料	相对价格
普通碳素结构钢	1	铬不锈钢	5
普通低合金结构钢	1.25	铬镍不锈钢	15
优质碳素结构钢	1.3 ~1.5	普通黄铜	13 ~17
易切钢	1.7	锡青铜、铝青铜	19
合金结构钢（Cr ~ Ni 钢除外）	1.7 ~2.5	灰铸铁件	1.4
镍铬合金结构钢（中合金钢）	5	球墨铸铁件	1.8
滚动轴承钢	3	可锻铸铁件	2 ~2.2
碳素工具钢	1.6	碳素铸钢件	2.5 ~3
低合金工具钢	3 ~4	铸铝合金、铜合金	8 ~10
高速钢	16 ~20	铸造锡基轴承合金	23
硬质合金（YT 类刀片）	150 ~200	铸造铅基轴承合金	10

注：1. 相对价格以普通碳素结构钢价格为基数 1 计算，相对价格在不同时期会有变化。

2. 钢材为热轧圆钢（ϕ29 ~ ϕ50mm），有色金属为圆材（ϕ20 ~ ϕ40mm）的价格。

3. 铸件为 10^3kg 以下，铸造工艺复杂等级为“一般”。

表 13-3　常用热处理方法的相对加工费用

热处理方法	相对加工费	热处理方法		相对加工费
退火（电炉）	1	调质		2.5
球化退火	1.8	盐浴炉淬火及回火	刀具、模具	6 ~7.5
正火（电炉）	1		结构零件	3
渗碳淬火 - 回火(渗碳层深 0.8 ~1.5mm)	6	冷处理		3
渗氮	38	高频感应淬火		按淬火长度计算，一般比渗碳淬火价格低廉
液体氮碳共渗	10			

注：热处理加工费以每千克质量计算，并以退火（电炉）每千克加工费为基数 1。

13.2.4　选材的一般步骤和应注意的问题

1. 选材的一般步骤

1）分析零件的工作条件及失效形式，提出关键的性能要求，同时考虑其他

性能。

2）与成熟产品中相同类型的零件、通用或简单零件，可采用经验类比法选材。

3）确定零件应具有的主要性能指标值。

4）初步选定材料牌号并决定热处理和其他强化方法。

5）对关键零件批量生产前要进行实验，初步确定材料选择、热处理方法是否合理、冷热加工性好坏。实验满意后可逐步批量生产。

2. 选材应注意的问题

1）实际性能和实验数据：常用手册中的性能数据都是小尺寸标准试样的试验结果，选材时应注意材料的尺寸效应。截面越大实际力学性能越低。

2）材料的加工工艺及热处理工艺：同种材料，不同的加工工艺，其性能数据也不同，应注意发挥材料的潜力。

3）注意材料的化学成分与热处理工艺参数有一定的波动范围。由于种种原因，实际使用材料的化学成分与试样的化学成分有一定的偏差，应注意由于化学成分的波动引起性能和相变点的变化。

13.2.5 典型零件选材及工艺分析

下面以齿轮为例介绍典型零件的选材和工艺分析：齿轮是机械制造中最常见的传动件之一，它的主要功用是传递功率和变换转速。

1. 齿轮的工作条件、失效形式及性能要求

齿轮的工作条件及失效形式：

1）传递扭矩时，齿根部承受较大的交变弯曲应力。

2）起动或啮合不均匀时承受冲击力。

3）齿啮合时齿面承受滚动、滑动造成的强烈摩擦和交变接触应力。

在上述工作条件下，齿轮的主要失效形式有：齿根疲劳断裂、齿面局部剥落和过度磨损。因此齿轮材料应具备以下性能：

① 高的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度。

② 高的齿面硬度和耐磨性。

③ 良好的心部强度和韧性。

④ 较好的工艺性。

2. 齿轮的选材及工艺分析

（1）机床齿轮　转速中等，载荷不大，工作平稳无强烈冲击，对齿轮心部强度和韧性要求不高。一般选用中碳钢制造，并经正火或调质处理后，再经高频感应淬火处理，所得到的硬度、耐磨性、强度和韧性即能满足其性能要求。常用的机床齿轮用钢的选材及热处理见表 13-4。

表 13-4　机床齿轮用钢的选材及热处理

序号	齿轮工作条件	钢种	最终热处理工艺	硬度要求
1	低速（＜0.1m/s），低载荷下工作的不重要的变速箱齿轮和交换齿轮架齿轮	45	840～860℃正火	156～217HBW
2	低速（＜1m/s），低载荷下工作的齿轮，如机床溜板上的齿轮	45	820～840℃水冷，500～550℃回火	200～250HBW
3	中速、中载荷或大载荷下工作的齿轮（如车床变速箱中的次要齿轮）	45	高频加热、水冷，300～340℃回火	45～50HRC
4	高速、中等载荷，要求齿面硬度高的齿轮（如磨床砂轮箱齿轮）	45	高频加热，水冷，180～200℃回火	54～60HRC
5	速度不大，中等载荷，断面较大的齿轮（如铣床工作面变速箱齿轮、立车齿轮）	40Cr 42SiMn 45MnB	840～860℃油冷 600～650℃回火	200～230HBW
6	中等速度（2～4m/s）、中等载荷下工作的高速机床进给箱、变速箱齿轮	40Cr 42SiMn	调质后高频加热，乳化液冷却，260～300℃回火	50～55HRC
7	高速、高载荷、齿部要求高硬度的齿轮	40Cr 42SiMn	调质后高频加热，乳化液冷却，220～260℃回火	54～60HRC
8	高速、中荷载、受冲击、模数＜5mm 的齿轮（如龙门铣床的电动机齿轮）	20Cr 20Mn2B	900～950℃渗碳，直接淬火或800～820℃油淬，180～200℃回火	58～63HRC
9	高速、重荷载、受冲击、模数＞6mm 的齿轮（如立车上重要的齿轮）	20CrMnTi 20Si5MnVB	900～950℃渗碳，降温至820～850℃淬火，180～200℃回火	58～63HRC

下面以某机床齿轮为例加以分析，其工艺路线如下：下料→锻造→正火、粗加工→调质→精加工→高频感应淬火及回火→精磨。

正火处理可以使组织均匀化，消除锻造应力，调整硬度，改善切削加工性能，属于预备热处理。对于一般齿轮，正火也可取代调质，并作最终热处理的部分。

调质处理可以使齿轮具有较高的综合力学性能，提高齿轮心部的强度和韧性，使齿轮能承受较大的弯曲应力和冲击力。由于调质后齿轮组织为回火索氏体，因此在淬火时变形较小。高频感应淬火可提高齿轮表面硬度和耐磨性，并使齿轮表面有压应力存在，增强了抗疲劳破坏能力。

低温回火（或自行回火）是在不降低表面硬度的情况下消除淬火应力，防止磨削裂纹的产生，提高抗冲击能力。

齿轮高频感应淬火后，其变形一般表现为内孔缩小，外径不变或减小。齿轮外径与内径比小于 1.5 时，内径略胀大，当齿轮有键槽时，内径向键槽方向胀大，形成椭圆形。这些微小的变形对齿轮精度影响不大，因为一般机床用的 7 级精度齿轮，淬火回火后均要滚光或拉孔。

（2）汽车、拖拉机齿轮　它们的工作条件比机床齿轮较恶劣，受力较大，超载和受冲击频繁，对耐磨性、疲劳强度、心部强度和冲击韧度等方面的要求均比机床齿轮高。实践证明，汽车、拖拉机齿轮用渗碳钢（20CrMnTi、20CrMnMo 等）制造，经正火处理，再经渗碳、淬火处理后使用较为合适。

下面以某载重汽车（载质量为 8t）变速箱中第二轴的二、三档齿轮为例进行分析，见图 13-1。

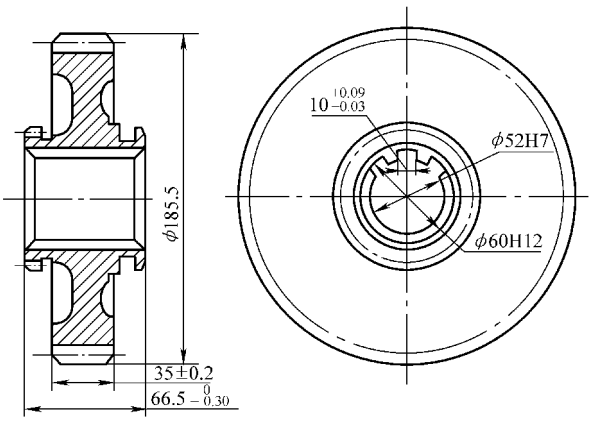


图 13-1　某载重汽车变速箱中第二轴的二、三档齿轮简图

汽车、拖拉机齿轮生产批量大，因此选择用钢时除有较好的力学性能外，还应有较好的工艺性能。

20CrMnTi 经渗碳淬火低温回火后，具有较高的力学性能，表面硬度 58 ~ 62HRC，心部硬度 30 ~ 45HRC。为改善其切削加工性，锻造后一般采用正火处理。

20CrMnTi 钢的热处理工艺性较好，有较好的淬透性。由于钢中含 Ti 元素，使钢对过热不敏感，所以在渗碳后可直接降温淬火。此外，尚有渗碳速度较快，过渡层较均匀，渗碳淬火后变形小等优点。这对制造形状复杂、要求变形小的齿轮零件来说是十分重要的。

20CrMnTi 钢不仅可制造截面在 30mm 以下，承受高速中等载荷及冲击、摩擦的重要齿轮，含碳量在上限时，还可制造截面在 40mm 以下，模数大于 10mm 的齿轮。

第二轴齿轮的工艺路线如下：下料→锻造→正火→机械加工→渗碳、淬火及低温回火→喷丸→磨内孔及换档槽→装配。

正火是为了均匀和细化组织，消除锻造应力，改善切削加工性；渗碳的作用是提高齿面碳的质量分数（0.8% ~1.05%）；淬火可提高齿面硬度并获得一定淬硬层深度（0.8 ~1.3mm），提高齿面耐磨性和接触疲劳强度；低温回火的作用是消除淬火应力，防止磨削裂纹，提高冲击抗力；喷丸处理是一种进一步强化手段，可使齿轮渗碳表层的压应力增大，有利于提高疲劳强度，同时也可清除氧化层。

13.3　塑料零件的选材

设计塑料零件和设计金属零件相同，要做到合理选材。设计人员首先应做到：既要充分了解零件的使用条件和工作环境，又要充分了解所采用塑料本身的特性。设计塑料零件时，不仅要考虑零件的使用性能，还应注意零件工作环境对性能的影响。因为环境的温度和湿度对塑料的力学性能、物理性能和化学性能等都有很大的影响。如有些轴承零件按南方的气候设计，在寒冷的北方就不一定能用，又如机器经长时间运转，随着摩擦热的产生出现“轧死”的情况也常发生。再如在湿度不大的车间，采用尼龙 6 或尼龙 66 做齿轮运转良好，而在湿度波动很大的车间运转情况却可能变坏，当改用吸湿性较小的尼龙 1010 之后情况则会有所好转。对于那些精度要求高的零件，则应选用热胀系数小，吸湿性小的塑料，如聚甲醛、聚碳酸酯等。

除此之外，在塑料零件选材时还应注意：

1）由于塑料导热性差，不易散热，因此，在选用时必须设计最有利的散热条件，如采用金属基复合材料，或者采取有利于散热的机械结构设计等。

2）塑料易于受热而膨胀变形，因此在设计塑料零件时应考虑到要有足够的配合间隙，通常采用塑料时的配合间隙要比采用金属时大些（但各种塑料的配合间隙也不完全相同），一般约为 $0.065d$（d 为轴承直径 mm）。

3）塑料是一种非刚性材料，在选用时必须考虑它的蠕变性。设计时应考虑加工制造时制品出现的内应力以及使用时发生蠕变的可能性，对那些受载较大，容易蠕变的零件可采用蠕变性较小的塑料，如聚苯醚、聚碳酸酯、聚砜等。此外，在塑料内增加碳纤维、玻璃纤维等可明显减少蠕变。采用塑料——金属复合材料则更好。

对于塑料制品出现的内应力，可像金属零件一样采用退火热处理方法加以消除。

4）用塑料制作轴承材料时，和金属一样，每种工程塑料均有其最高的可能使用负荷（P）、旋转线速度（v）以及其极限 Pv 值。

13.3.1　塑料选用的一般原则和方法

1. 选用的一般原则

正确选用塑料，必须满足以下三方面要求：足够的使用性能、优良的工艺性及

合理的经济性。

使用性能应是多方面的。如传动零件，首先必须符合力学性能要求，同时也应兼顾其热性能或耐蚀性；电气零件则首要的是介电性能，同时顾及力学性能、热性能或耐蚀性；化工零件除必须满足耐蚀性要求外，有些零件须同时考虑力学性能，尤其应该注意的是，塑料各种性能之间的关系比金属材料密切。温度或其他介质对塑料的力学性能影响很大，故当条件变化，则性能随之而变。

工艺性的好坏与生产批量和零件特点有关，故判断所选材料的工艺性是否优良，应以它为依据。如生产批量很大的制品，一般选择可用注射成型的热塑性塑料比热容固性塑料为好，但当零件尺寸较大时，则选用可浇注成型的材料更为适宜；又如大型轴承或齿轮，当批量不很大，常选择 MC 尼龙，而对尺寸小，批量大的轴承，则应选用普通尼龙，以便于采用注射成型。

在满足使用要求和工艺可行的前提下，还应注意经济性，如尽可能选用价廉的树脂、国产材料等。但是，经济性往往不能只从材料单价衡量，而应以零件单价实际成本的高低为标准。比如有些材料单价虽稍高，但因其性能较好，使用寿命较长，从而使零件总成本降低。

2. 选用的一般方法

（1）全面了解零件的使用要求　对塑料零件，不仅要知道其正常工作对零件所应具有的性能要求，同时必须弄清工作环境（如温度、湿度、介质等）及其可能发生变化的情况等。因为条件变化，其性能上的差异较大。

（2）掌握常用材料的性能特征　常用塑料的性能已在前面述及，其具体指标、数据是在一定的条件测得的，使用时应注意实际工作情况的影响。并且应就每一种材料找出 1 ~ 2 项比较突出的性能，作为优选对象。如某种材料特别耐腐蚀，一般优先考虑用于化工方面的零件等。值得注意的是改性或增强后的性能。

（3）初步选定，反复试验　初选时可能有几种材料性能相近，必须综合考虑，选择其中优点最多的一种，制出的零件经多次反复试验和实际使用的考验，才能最后确定。

13.3.2　典型零件的选材

在下列所介绍的各种情况下，建议选用塑料材料。

（1）要求制品轻质　塑料材料的相对密度在 0.83 ~ 2.2 范围内，在众多材料中只比木材的相对密度稍高一点（木材的相对密度在 0.28 ~ 0.98 范围内），而且泡沫塑料材料的相对密度会更低，其相对密度在 0.1 ~ 0.4 范围内，高发泡塑料制品的相对密度甚至比 0.1 还要低许多。

为此，在制品特别强调质轻重，而木材又不能满足需要时，一般选用塑料或泡沫塑料。

（2）要求制品比强度高　在各种材料中，塑料材料具有比较高的比强度，比

特种合金铝还要高。在一些既要求减重又要求高强度的中、低载荷使用环境中，塑料材料是最合适的材料品种，如各种交通工具中的结构部件，都可用相应的塑料代替。在汽车工业中，塑料结构件的使用量已达到 6% 以上，而且正逐步增长；在飞机、轮船及航天工具上，使用塑料材料减重的意义更巨大。

（3）制品的形状复杂　在各种材料中，塑料具有易加工的特点，它适于成型形状复杂的制品。

对于形状复杂的制品，宜采用易加工的塑料材料，用注塑方法成型。例如一个汽车用油箱，用金属材料制造，有 5 个部件组成，需要 23 道工序，加工费占 50%；用塑料材料制造，有 3 个部件组成，只需 3 道工序，加工费仅为 20% ~30%。

（4）中低载荷作用下的结构制品　由于塑料材料在强度上不及高强度金属材料和特种陶瓷材料，且其强度值随温度、湿度的升高而迅速下降。所以，它不适于连续高温且有载荷作用场合使用，只适用于中低温度下、中低载荷作用的结构制品。例如，上述使用条件下的齿轮、轴承等。

（5）要求制品的耐蚀性好　塑料具有很高的耐蚀性，其耐蚀性仅次于玻璃及陶瓷材料。不同品种塑料的耐蚀性不同，在塑料中聚四氟乙烯的耐蚀性最好，可耐各种强酸、强碱及强氧化剂；其他塑料大都不耐强酸、强碱及强氧化剂。

一些化工管道、容器及需要润滑的结构部件都宜应用耐蚀塑料材料制造。

（6）要求综合性能好的制品　塑料材料的综合性能较高。以 PC 及 PSF 为例，在其大分子中，同时具有刚、韧、硬的性能，即同时具有拉伸、弯曲、压缩、剪切、冲击、耐磨，又具有耐腐蚀、电绝缘性优异等优点。因此，在一些要求综合性能好的制品，如力学性能、热性能、电性能、环境性都要求时，应选用塑料材料。

（7）要求具有自润滑性的制品　很多塑料品种都具有优异的自润滑性，如 PA、POM、UHMWPE 及 F4 等。在很多场合，摩擦接触的结构制品禁止使用润滑剂，以防止污染，如食品、纺织、日用及医药机械等。用自润滑性塑料材料制造运动型结构制品，不经润滑即可正常运动，而且可避免污染。如日常生活用的拉链，常选用 PA、POM 等自润滑树脂制造。

（8）要求制品具有防震、隔热、隔声性能　塑料尤其是泡沫塑料同时具有优异的防震、隔热、隔声性能，只有木材具有相近的性能，而其他材料都无可比拟。

在防震应用上，软质 PU、PE、PS 泡沫塑料最为常用。其中软质 PU 泡沫塑料常用于体育器材，而 PE、PS 常用于防震包装。

在隔热应用中，常用硬质 PU、PS、PF 和脲醛等泡沫塑料。

在隔声应用中，PS 泡沫塑料最常用。

13.3.3　不宜选用塑料的情况

塑料材料虽具有很多优点，其综合性能又好，但在有些使用条件要求苛刻的场

合，塑料往往不能使用，只能由其他材料取而代之。

一般情况，在下列使用条件下，建议不宜选用塑料材料而应选用其他材料。

（1）要求材料强度特别高　用超强纤维增强的工程塑料虽强度会大幅提高，并且比强度高于钢。但在大载荷应用场合，如拉伸强度超过 300MPa 时，塑料材料仍满足不了需要。此时只好用高强度金属材料或超级陶瓷材料了。

（2）要求耐热温度高　塑料的最高使用温度一般不超过 400℃，而且大多数塑料的使用温度都在 100～260℃范围内；只有不熔聚酰亚胺、液晶聚合物、聚苯酯、聚苯并咪唑（PBI）、聚硼二苯基硅氧烷（PBP）的热变形温度可大于 300℃。因此，如果使用环境的温度长期超过 400℃，几乎没有塑料材料可供选用；如果使用环境的温度短期超过 400℃，甚至达到 500℃以上，并且无较大的负荷，有些耐高温塑料可短时使用。不过以碳纤维、石墨或玻璃纤维增强的酚醛等热固性塑料很特别，虽然其长期耐热温度不到 200℃，但其瞬时可耐上千度高温，可用做耐烧蚀材料，用于导弹外壳及宇宙飞船面层材料。

（3）要求尺寸精度高　由于塑料材料的成型收缩率大且不稳定，塑料制品受外力作用时产生的变形大，热胀系数比金属大几倍。因此，塑料制品的尺寸精度不高，很难生产高精度产品。不同塑料材料可生产制品的精度见表 13-5，从表中可以看出，对于 1、2 级精度的制品，建议尽可能不要选用塑料材料，而选用金属或高级陶瓷。

表 13-5　不同塑料材料对应的产品精度

精度等级	可用塑料材料品种
1	无
2	无
3	PS、ABS、PMMA、PC、PSF、PPO、PF、AF、EP、UP、F4、UHMWPE、30% GF 增强塑料等，其中以 30% GF 增强塑料的精度最高
4	PA 类、氯化聚醚、HPVC 等
5	POM、PP、HDPE 等
6	SPVC、LDPE、LLDPE 等

（4）高绝缘性材料　在超高压电力输送环境中，要求绝缘材料的耐电晕性特别突出。而塑料材料除 PE、PI 等的耐电晕性较好外，其他塑料的耐电晕性都不好。对于超过 550kV 以上的超高压绝缘材料，几乎没有一种塑料材料可以满足需要了。此时，建议选用云母等其他绝缘材料。

（5）高导电材料　塑料材料素以绝缘性能好而著称，但近年来开发出不少导电性塑料品种，具体有聚乙炔、聚苯胺、聚吡咯、聚噻吩等，这些导电塑料的导电性能接近于导电金属。但在目前的开发阶段，塑料导体仍存在诸多不足。例如，导电性能不高，强度低，原料价格十分昂贵，成型加工困难。为此，在最近一段时期

内，除非使用环境特殊需要（如质轻、形状复杂、耐腐蚀等），建议不用塑料材料做高导电材料，而选用导电金属材料。

（6）高磁性材料　传统的磁性材料一直为铁氧体和稀土两类。磁性塑料材料一直为树脂与磁粉的复合材料，其磁性不高，只能用于对磁性要求不高的场合。已合成的磁性塑料有：①聚双 2,6 – 吡啶基辛二腈，磁性可与磁铁相匹敌，颜色为黑色；②金属钒与四氰乙烯的聚合物，可在 77℃以下保持较好的磁性；③聚碳烯、聚席夫碱的铁螯合物。

但真正用做高磁性材料的还没有，只是处于研究开发阶段。因此，建议目前不要选用塑料材料用做高磁性材料，而低磁性材料可选用复合磁性塑料材料。

13.3.4　塑料的加工性能

塑料的加工性能是指其树脂转变成制品的易难程度。不同树脂品种的加工性能大不相同，有的树脂很容易加工，而有的树脂则很难加工。在具体选用树脂时，一定要考虑所选树脂的加工性能如何。一般要考虑的内容有：树脂的可加工性、加工成本、加工废料三方面问题。

1. 塑料的可加工性

不同树脂品种的可加工性能不同。在选材时，如几种树脂其他性能相近，此时必须考虑其可加工性，应尽可能选用那些易加工的树脂品种。有时不得不选用难加工树脂，要详细考虑其加工特性，以制定正确的加工方法。

一般可将难加工树脂分为如下三类。

（1）易热分解类树脂　是指熔融温度与分解温度接近或熔融温度超过分解温度的一类树脂。具体有 PVC、PVDC、CPE、PVF 及纤维素等，其中 PVC 为最典型的代表品种，PVC 的熔融温度为 170℃，而其热分解温度为 140℃，因此 PVC 树脂在熔融之前就已经分解，难以用熔融的方法加工。

在易分解类树脂的加工中，必须加入增塑剂以降低熔融温度或加入热稳定剂以提高热分解温度，从而使其分解温度在熔融温度以上，差距越大越好。常用的增塑剂有：邻苯二甲酸酯类、脂肪族二元酸酯类、磷酸酯类、环氧化合物类等，常用的热稳定剂有：铅盐类、金属皂类、有机锡类、有机锑类及稀土类等。

另外，POM、TPU、PA 等在加工中易发生热氧化降解，常加入抗热氧稳定剂如抗氧剂等。

（2）热固性树脂　包括 PF、AF、EP 及 UP 等，其纯树脂的性能不好，而且熔融粘度特别低，几乎成为流体，因此难以用熔融方法加工，属难加工类树脂。

在热固性树脂的加工中，要加入可使大分子交联（又称为固化）的助剂即固化剂（又称为交联剂）以及固化促进剂等。

常用的固化剂有：胺类、酸酐类、咪唑类等，以及硫磺类和过氧化物类。

热固性树脂常用压制方法加工成型。近年来开发出可注塑的 PF 及 AF 料，其

注塑工艺比较难控制，且需用专用注塑机。因此，除非塑料制品形状特别复杂和精度要求较高，否则尽可能不用注塑方法加工。

（3）高熔融粘度类树脂　包括 F4、UHMWPE、PPO 及聚苯酯等。这类树脂的共同特点为：在达到熔融温度时，树脂处于熔融状态，但由于其熔融粘度十分高，虽熔融但不流动，具有类似金属的非粘性流动特性。

高熔融粘度类树脂一般采用烧结或冷挤压的方法加工成坯料，再用机械手段加工成具体尺寸的制品。因此，高熔融粘度类树脂难以加工出复杂形状的制品。

如果塑料制品的性能要求不高，可对高熔融粘度类树脂进行共混改性，即在其中混加易加工树脂。例如，在 PPO 中混入 PS 等，可使 PPO 用常规方法加工，但原有性能会下降。

2. 塑料的加工成本

塑料的加工成本包括加工设备成本和加工能耗两个方面。其中加工能耗又包括加工前的干燥处理、加工中的加工温度高低、加工时间长短、制品的后处理等。

在具体选材时，对塑料的加工成本主要考虑如下几方面的因素。

（1）在加工设备成本方面

1）要选用设备投资小的塑料加工设备。塑料有很多加工方法，主要有：压延成型、注塑、挤出、中空吹塑、压制、真空吸塑等成型方法。不同塑料加工方法的设备投资大小不同，而且相差往往很大。

在具体选材时，尽可能选用加工设备投资少的成型方法。例如，生产一次性饮水杯，既可注塑也可吸塑成型；从设备投资上考虑，要采用吸塑成型方法加工。又如，同是 HDPE 面包用周转箱，可用注塑和压制两种方法加工，但压制方法投资小，建议尽可能选用压制方法加工。

2）要选用本生产企业现有的塑料加工设备。利用现有设备，可大大节省设备投资。例如，要生产 PVC 农用大棚膜，可用压延和挤出吹塑两种方法加工，而本生产企业现有压延设备，则应选用压延法生产 PVC 膜。虽然挤出吹塑法的投资远少于压延法，但毕竟要增加新的投资。

（2）在加工能耗方面　尽可能选用加工能耗低的加工方法，具体应注意以下几个方面。

1）尽可能选用不需干燥可直接加工的塑料原料。如 PE、PP、PVC 及 F4 等塑料原料都不需干燥；而大部分工程塑料和透明性塑料如 ABS、POM、PA、PC、PMMA、PS、PET、AS 及 MPPO 等都需要干燥，这势必要增加能耗。

2）尽可能选用不需加工后处理的塑料原料。有些刚性分子链聚合物如 POM、PS、PC 及 MPPO 等，制品中容易残留内应力，在使用中易产生应力开裂现象。为此，对这些材料要进行加工后处理，以消除残留内应力，这也会引起能耗的增大。

3）尽可能选用加工温度低的塑料原料。塑料的加工温度越低，加工中的能量消耗则越低。在塑料材料中，PC、MPPO 等通用工程塑料或特种工程塑料的加工温

度高，加工能耗也高，尽可能少选。

4）尽可能选用对加工设备磨损和腐蚀小的塑料原料。以延长设备的使用寿命，降低设备的年折旧成本。

（3）在加工精度方面　不同的塑料加工方法，制成制品的精度不同。注塑的制品精度最高，而真空吸塑成型的制品精度最低，不同成型方法的成型精度由大到小的顺序为：注塑 > 挤出 > 注吹成型 > 挤吹成型 > 压制成型 > 压延成型 > 真空吸塑成型。

在具体选用材料时，要视制品的尺寸精度要求来确定加工方法。

（4）在加工形状方面　不同加工方法加工的制品形状不同。从制品形状复杂程度上看，注塑可制成形状复杂的制品。从制品尺寸大小上看，压延成型、真空吸塑成型、压制成型、缠绕成型可制成大面积的制品；如大型化工储罐及游船等，都可用缠绕成型制成。

3. 塑料加工的废料

不同的加工方法，产生的废料比例大小不同；不同的塑料材料，废料的可利用率不同。在具体选用时，应尽可能选用产生废料少的加工方法和废料可重复利用的塑料原料，以最大限度地增加原料利用率。在这方面，具体应注意如下问题。

1）对于透明性塑料制品，其加工废料不能重复使用。因重复使用会影响制品的透明性。

2）对于卫生性要求很高的塑料制品，其加工废料不能重复使用。因重复使用会影响制品的卫生性。

3）对于易分解性树脂，其加工废料不能重复使用。因废料已产生分解，重复使用会影响制品的性能。

4）对于其他品种的塑料材料，其加工废料可多次重复使用，如 POM 塑料，加工废料可加入 30%，并可循环使用 10 次左右。再如，MPPO 塑料，废料可加入 20%，可循环使用 5 次以上。

5）对于不同的加工方法，废料的产生率不同，具体大小顺序如下：真空吸塑成型 > 挤出吹塑成型 > 注塑 > 压延成型 > 压制成型 > 挤出。

其中，以真空吸塑成型一次性口杯为例，其废料率高达 30%。

13.3.5　塑料制品的成本

在具体选用塑料材料时，要首选成本低的原料，以制成物美价廉的塑料制品，提高在市场上的竞争力。

塑料制品的成本构成主要包括原料的价格、加工费用、使用寿命、使用维护费等。其中，塑料的加工费用在前一节已介绍，本节只介绍其他三方面的因素。

1. 塑料原料的价格

塑料原料的价格对塑料制品的成本影响最大。对于注塑制品，原料的价格一般

可占产品总成本的 60% ~70%；对于挤出制品，原料的价格一般可占产品总成本的 70% ~80%。

在具体选用塑料原料时，如果几种原料的性能接近，则应首先选用价格低的原料。即使价格低的原料在少数非主要性能上可能满足不了制品的要求，但因价格低也应尽可能选用。至于少数性能的缺陷，可通过适当的改性处理来弥补。

常用塑料原料的相对价格见表 13-6。

表 13-6　常用塑料原料相对价格

材料	单位重量相对价格	单位体积相对价格	单位强度相对价格
聚苯乙烯	1	1	1
聚乙烯（高压）	0. 597	0. 512	2. 50
聚乙烯（低压）	0. 77	0. 682	1. 129
聚丙烯	0. 70	0. 592	0. 86
ABS	1. 62	1. 62	1. 285
聚氯乙烯	0. 48	0. 647	0. 682
聚氯乙烯（板）	0. 81	1. 09	0. 885
尼龙 1010	4. 69	4. 609	4. 307
尼龙 610	4. 74	4. 811	4. 496
尼龙 6	2. 92	3. 159	2. 395
聚碳酸酯	3. 55	3. 991	2. 978
聚甲醛	2. 49	3. 305	2. 360
聚砜	4. 27	4. 949	3. 152
有机玻璃（板）	4. 40	4. 864	4. 480
酚醛树脂	1. 12	1. 332	1. 263

2. 塑料制品的使用寿命

考虑产品的价格时，不要只考虑产品成本的整体价格，而不考虑产品的单次使用价格。单次使用价格指产品在使用寿命内，每次使用的产品价格，它与产品的使用寿命长短有关，使用寿命越长，其单次使用价格越低。例如，LDPE 农用大棚膜，普通 LDPE 大棚膜的价格为 10k，使用周期为农作物一茬，其单次使用价格为 10k；而长寿 LDPE 大棚膜的价格为 15k，其使用周期为二茬，其单次使用价格为 7. 5k。由此可见，长寿 LDPE 大棚膜的单次使用价格比普通 LDPE 大棚膜的单次使用价格低 25%。所以在选材时，应尽可能选用单次使用价格低的塑料材料。

3. 塑料原料的来源

塑料原料的来源指原料在市场上是否容易购得。在具体选用塑料材料时，应尽可能选择那些来源广泛、可随时随地买得到的塑料品种。

在具体选材时，如从塑料原料的来源上考虑，应注意以下几点。

1）选择通用的塑料材料，通用塑料材料的生产厂家多，很方便购得。

2）选用已进入生产成熟期的塑料原料，因为处于开发初期的任何产品，在性能上往往存在这样或那样的不足；同时，由于开发初期的开发费用投入多，生产规模小，导致生产成本偏高。

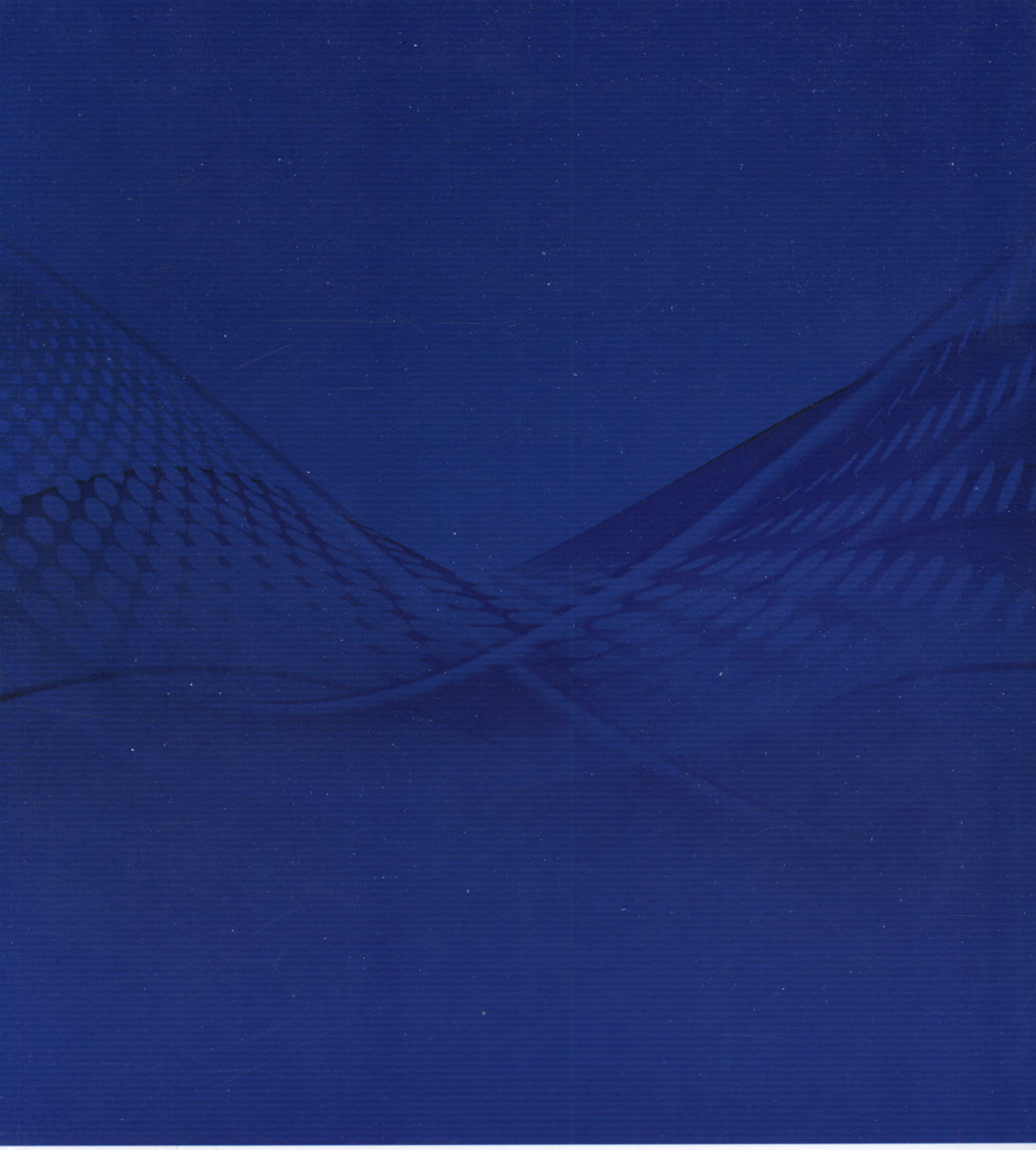
3）选用市场上不紧俏的原料，紧俏的原料，往往不易购得，且价格偏高。

4）选用产地近的原料，产地近的原料，一方面可节省运输费用，缩短运输时间；另一方面，由于运输时间短，可以每次少进，以降低资金占用率。

5）选用国产原料，这不仅是一个扶植民族工业的爱国问题，更重要的是成本问题。与国产原料相比，国外原料一是增加了进口关税和跨洋过海的运费，二是发达国家的劳动力成本高。因此进口原料的价格往往偏高，虽然其在性能上比国产原料要好一些，但其性价比还是偏高。

参 考 文 献

[1] 相瑜才，孙维连．工程材料及机械制造基础［M］．北京：机械工业出版社，1998.
[2] 王文广．塑料材料的选用［M］．北京：化学工业出版社，2001.
[3] 许健南．塑料材料［M］．北京：中国轻工业出版社，1999.
[4] 王建清．包装材料学［M］．北京：中国轻工业出版社，2009.
[5] 张光玉．非金属材料学［M］．北京：中国铁道出版社，1994.
[6] 崔占全，孙振国．工程材料［M］．2 版．北京：机械工业出版社，2008.
[7] 安素琴．建筑装饰材料［M］．北京：中国建筑工业出版社，2000.
[8] 张景良．木材知识［M］．北京：中国林业出版社，1983.
[9] 李士学，等．胶粘剂制备及应用［M］．天津：天津科学技术出版社，1984.
[10] 高学敏，等．粘接和粘接技术手册［M］．成都：四川科学技术出版社，1990.
[11] 饶勃．实用装饰工手册［M］．上海：上海交通大学出版社，1991.
[12] 程能林．工业设计手册［M］．北京：化学工业出版社，2008.
[13] 伍强，徐兰英，王晓军．工程材料［M］．北京：化学工业出版社，2011.



地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 一般工业／材料工程
ISBN 978-7-111-43720-8
策划编辑◎张秀恩 / 封面设计◎陈沛

ISBN 978-7-111-43720-8
9 787111 437208
定价：69.00元